

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л.Д. Писаренко
“ ” _____ 2019 р.

Дипломний проект
освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»

з напрямку підготовки 6.050802 – Електронні пристрої та системи
на тему: «Сонячні елементи на гнучких підкладках»

Виконав:

студент IV курсу, гр. ДЕЗ-51

_____ Сусла Дмитро Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ доцент, к.т.н., Цибульський Леонід Юрійович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультанти:

Нормоконтроль _____ доцент, к.т.н. Чадюк Вячеслав Олексійович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____ професор, д.т.н. Кузьмичев Анатолій Іванович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет Е л е к т р о н і к и
Кафедра Електронних приладів та пристроїв
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Спеціаліст
Спеціальність: 6.050802 – Електронні пристрої та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д.Писаренко

« ____ » _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Сусла Дмитру Олександровичу

1. Тема проекту «Сонячні елементи на гнучких підкладках»

і керівник проекту Цибульський Леонід Юрійович, доцент.

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2019 р., № _____

2. Строк подання студентом проекту «5» червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту: Товщина підкладки до 15 мкм; сонячні елементи на основі гетеро структур CdTe/CdS, ефективність перетворення сонячного елементу не менше 10%

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Анотація; вступ; побудова та функціонування сонячних елементів на гнучких підкладках; розробка конструкторської документації на пристрій. Вибір оптимального шару для формування сонячного елементу на гнучкій підкладці. Експериментальне дослідження тонкоплівкових гнучких сонячних елементів.

5. Перелік графічного матеріалу: складальне креслення пристрою, електрична схема сонячної батареї; допоміжні графічні матеріали: побудова та функціонування сонячних елементів на гнучких підкладках .

6. Дата видачі завдання _15.04.2019_р._

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по системам та методам розробки сонячних елементів на гнучких підкладках.	15.04.2019– 19.04.2019	
2	Розгляд структури сонячних елементів CdTe/CdS на гнучких підкладках та способи їх виготовлення.	20.04.2019– 24.04.2019	
3	Розробка тонкоплівкових сонячних елементів на гнучких підкладках та розрахунок їх параметрів.	25.04.2019– 30.04.2019	
4	Вибір оптимального шару для формування сонячного елемента на гнучкій підкладці.	02.05.2019– 07.05.2019	
5	Формування сонячних елементів на гнучких підкладках, обробка матеріалів верхньої комірки та виготовлення CdSe.	08.05.2019– 15.05.2019	
6	Експериментальне дослідження тонкоплівкових гнучких сонячних елементів.	16.05.2019– 23.05.2019	
7	Методологія експерименту, результати та аналіз даних.	24.05.2019– 29.05.2019	
8	Оформлення пояснювальної записки.	29.05.2019– 02.06.2019	
9	Креслення плакатів з формулами та графіками, підготовка доповіді.	5.06.2019	

Студент гр. ДЕЗ-51 _____ **Д.О. Сусла**

Керівник проекту _____ **Л.Ю. Цибульський**

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: «Сонячні елементи на гнучких підкладках»

Київ – 2019

РЕФЕРАТ

Сонячні елементи на гнучких підкладках

Дипломний проект освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 171- Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. Сусли Дмитро Олександрович. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕЗ-51. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 103 с., іл. 37, табл. 14.

Ключові слова:, сонячний елемент, гнучкі підкладки, телурид кадмію, фотоелектричні структури, гетероструктури

Короткий зміст роботи: Проведено порівняння характеристик і питомої потужності тонкоплівкових сонячних елементів на гнучких підкладках. Метою проекту є розробка 20% тонкоплівкових пристроїв з високим коефіцієнтом потужності/ваги. Наведені декілька підходів для поліпшення загальної ефективності пристрою та співвідношення потужності/ваги. Також запропоновано і змодельовано складову напівпровідникового тандемного сонячного елемента на гнучкій підкладці, що може задовольнити мету з використанням аналізу мікроелектронних і фотонних структур (АМФС). Із поліпшенням матеріалів, ефективність сонячного елемента на гнучкій підкладці наближається до 25%.

АНОТАЦІЯ

Проведено порівняння характеристик і питомої потужності тонкоплівкових сонячних елементів (СЕ) на гетероструктурах *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au*, які сформовані на скляних підкладках, поліамідних плівках та фользі. Заміна скляної підкладки поліамідної плівкою дозволяє приблизно в п'ятдесят разів підвищити питому потужність сонячного елемента на гетероструктурах *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au*. Кінцевою метою проекту є розробка 20% тонкоплівкових СЕ з високим коефіцієнтом потужності/ваги. Наведені декілька підходів для поліпшення загальної ефективності СЕ на гетероструктурах та співвідношення потужності/ваги. Один підхід передбачає використання дуже легких гнучких підкладок, таких як полііміди (наприклад, марки Kapton ТМ) або металева фольга. Запропоновано і змодельовано складову напівпровідникового тандемного СЕ на гетероструктурах, що може задовольнити мету з використанням методики аналізу мікроелектронних і фотонних структур (АМФС). Моделювання сучасних пристроїв у тандемному форматі свідчить про те, що ефективність СЕ може досягати близько 20%. І з поліпшенням матеріалів, ефективність наближається до 25%. Для реалізації таких складних СЕ на гетероструктурах необхідно вирішити декілька важливих технічних питань: розробка матеріалу з широкими забороненими зонами, розробка прозорих контактів і орієнтація на структуру 2-термінального (з більш складною обробкою і тунельним з'єднанням) пристрою. Фотоелектричні структури на легких і гнучких підкладках мають ряд переваг перед конструкціями на основі важкого скла в наземних і космічних умовах. Елементи на гнучкій фользі, не є крихкими, вимоги до опорних конструкцій мінімальні, і вони можуть бути намотані на будь-які відповідні конструкції.

S U M M A R Y

A comparison was made of the characteristics and specific power of thin-film solar cells (SCs) on ITO / CdS / CdTe / Cu / Au heterostructures formed on glass substrates, polyamide films and foil. Replacing the glass substrate with a polyamide film makes it possible to increase the specific power of the solar cell on ITO / CdS / CdTe / Cu / Au heterostructures approximately fifty times. The ultimate goal of the project is to develop a 20% thin-film solar cell with a high power / weight ratio. There are several approaches to improve the overall efficiency of solar cells on heterostructures and the power / weight ratio. One approach involves the use of very light flexible substrates, such as polyimides (for example, Kapton TM) or metal foil. A semiconductor tandem SC component on heterostructures was proposed and modeled, which can satisfy the goal using the microelectronic and photon structures (AMPS) analysis technique. Modeling modern devices in a tandem format suggests that the efficiency of an ESS can reach about 20%. And with the improvement of materials, the efficiency approaches 25%. To implement such complex SCs on heterostructures, several important technical issues need to be solved: the development of material with wide forbidden zones, the development of transparent contacts and the orientation to the structure of a 2-terminal (with more complex processing and tunneling connection) devices. Photovoltaic structures on light and flexible substrates have several advantages over heavy glass based structures in terrestrial and space conditions. Elements on a flexible foil are not fragile, the requirements for supporting structures are minimal, and they can be wound onto any appropriate structures.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	12
1 СТРУКТУРИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ	14
1.1 Тонкоплівкові кремнієві сонячні елементи на гнучких підкладках	14
1.2 Сонячні елементи CdTe/CdS на гнучких підкладках	17
1.1.1 Пристрої на гнучкій металевій фользі	17
1.1.2 Електроосадження CdTe на підкладці Mo	18
1.1.3 Плівки CdTe на підкладках Mo за допомогою СЗП	20
1.1.4 Формування гетеропереходу CdTe/CdS	21
1.1.5 Вплив температури віджигу на фотоелектричні параметри	22
1.1.6 Конфігурація суперструктури	26
1.1.7 Конфігурація підкладки	27
1.2 Гнучкі СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au з високою питомою потужністю	28
1.2.1 Методика отримання і дослідження зразків	29
1.2.2 Результати і їх обговорення	31
1.3 Багатофункціональні тонкоплівкові сонячні елементи на гнучких підкладках для космічної енергії	37
1.4 Висновки до розділу	38
2 РОЗРОБКА ТОНКОПЛІВКОВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ГНУЧКИХ ПІДКЛАДКАХ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ ПАРАМЕТРІВ	41
2.1. Вибір оптимального шару для формування СЕ на гнучкій підкладці	41
2.2 Формування легованих шарів для СЕ на гнучких підкладках	44
2.3 Формування сонячних елементів на гнучких підкладках	45
2.2.2 Обробка матеріалів верхньої комірки	58
2.2.3 Виготовлення CdSe	58
2.2.4 CIGS2 Тонкі плівки на металевій фользі	61
2.3 Висновки до розділу	62
3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ГНУЧКИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	65
3.1 Оптичні властивості гетеропереходу CdS/CdTe, отримані методом фізичного осадження з парової фази	65
3.2 Методологія експерименту	67
3.3 Результати та аналіз даних	68
3.4 Висновки до розділу	78
ВИСНОВКИ	79
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	81
ДОДАТОК А	89
ДОДАТОК Б	95
ДОДАТОК В	99

					БР.171.051.010 ПЗ			
Змн.	Апк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Свєсла Д.А.				Сонячні елементи на гнучких підкладках		Літ.	Апк.
Перевір.	Цибульський Л.Ю.							Апк.ввів.
Реценз.							8	103
Н. Контр.	Чадюк В.О.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕЗ-51	
Затверд.	Писаренко Л.Д.							

Додаток А. Характеристики і фізичні властивості поліетилентерефталату та поліаміда 6.

Додаток Б. Різновиди марок поліаміда 6.

Додаток В. Фізичні та теплові властивості, термічний коефіцієнт розширення плівки Kapton.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АМФС – аналіз мікроелектронних і фотонних структур

ЕФО – електрофоретичне осадження;

ЕО – електро-осадження;

ОПП – осадження паровим потоком;

ПІ – поліїмід;

ПЕТ– поліетилентерефталат (поліестер, дакрон, майлар, лавсан);

ПЕН – поліетиленнафталат;

ПСО – прозорий струмопровідний оксид;

СЗП – сублімація в закритому просторі;

СЕ – сонячні елементи;

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія;

a-Si – аморфний кремній;

a-Si:H – аморфний гідрований кремній;

c-Si – монокристалічний кремній;

nc-Si – нанокристалічний кремній;

pc-Si – протокристалічний кремній;

AES – Auger electron spectroscopy – Оже-спектроскопія;

AFM – atomic force microscopy – метод атомно-силової мікроскопії – МАСМ;

AMPS – Analysis of Microelectronic and Photonic Structures – аналіз мікроелектронних і фотонних структур – АМФС

AM0 – atmosphere 0 – нульова атмосфера: спектр чорного тіла в 5800 К у вакуумі (поза атмосферою);

CIGS – copper indium gallium selenide – селенід міді-індію-галію;

CSS – close spaced sublimation – сублімація в закритому просторі – СЗП;

CVD – chemical vapor deposition – хімічне осадження з парової фази – ХОПФ;

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ED – electrophoretic deposition – електрофоретичне осадження – ЕО;
 ELD – electrodeposition – електроосадження;
 EPMA – electron probe micro-analyzer – рентгеноспектральний мікроаналіз – РСМА;
 FF – filling factor – фактор заповнення;
 FTO – fluorine doped tin oxide – легований фтором оксид олова;
 GRC – Glenn research center – дослідницький центр Гленна – ДЦГ;
 ITO – indium tin oxide – оксид індія-олова;
 micro-PL – micro-photoluminescence – метод мікрофотолюмінесценції – МФЛ;
 MIS – metal-insulator-semiconductor – метал-ізолятор-напівпровідник – МІН;
 MSP – mass specific power – масова питома потужність – МПП;
 PECVD – plasma-enhanced chemical vapor deposition – метод плазмохімічного осадження – МПХО;
 PEN – polyethylene naphthalate – поліетиленнафталат;
 PI – polyamide – поліамід;
 PV – photovoltaic – фотоелектрика;
 PVD – physical vapour deposition – вакуумне напылення – ВН;
 QE – quantum efficiency – квантова ефективність – КЕ;
 roll coating – рулонне покриття;
 SEM – scanning electron microscopy – скануюча електронна мікроскопія – СЕМ;
 SEP – solar electric propulsion – сонячний електричний двигун – СЕД;
 SPS – solar power satellite – супутник сонячної енергії – ССЕ;
 SS – stainless steel – нержавіюча сталь – НС;
 TCO – transparent conductive oxide – прозорий провідний оксид – ППО;
 VTD – vapor transport deposition – осадження паровим потоком;
 XRD – X-ray diffraction – метод дифракції рентгенівських променів – ДРП;

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ВСТУП

Сонячна енергія – одна з найпоширеніших, екологічно чистих відновлюваних джерел енергії на нашій планеті. За останні три десятиліття було досягнуто значного прогресу в розробці технологій використання електрики від сонячного випромінювання. Найбільш часто для сонячних елементів (СЕ) використовують полікристалічний кремній (Si). За останні декілька десятиліть була виконана значна робота по розробці тонкоплівкових сонячних елементів для заміни дорогих монокристалічних і пластинчастих сонячних елементів.

В останні роки спостерігається значне зростання інтересу до сонячних елементів на гнучких підкладках ("гнучких" сонячних елементів). З одного боку, великий інтерес випливає з того, що такі батареї мають невелику товщину і, відповідно, малу вагу, що полегшує їх доставку та використання в тих місцях, куди важко доставляти сонячні елементи, утворені на важких скляних підкладках. Інша особливість таких сонячних елементів у тому, що вони можуть бути приєднані до об'єктів, що мають складну, а не гладку поверхню, наприклад одяг. Низька собівартість, простота і мала вага сонячних елементів на гнучких підкладках роблять їх привабливими для різних енергетичних об'єктів, що працюють в космічному просторі.

Полікристалічні тонкоплівкові сонячні елементи зазвичай виготовляються на скляних підкладках товщиною 3-5 мм, покритих прозорим струмопровідним оксидом (PCO), і не дають переваг з точки зору ваги або адаптації форми до зігнутих поверхонь. Виробництво тонкоплівкових сонячних елементів на гнучкій металевій фользі або полімерних підкладках пропонує кілька переваг для космічного і наземного застосування. Оскільки сонячний елемент може бути товщиною всього 5 мкм, а гнучка підкладка має товщину 5-10 мкм, економія ваги в порівнянні з скляними підкладками значна. Крім того, висока стабільність сонячних елементів *CdTe* при протонному і електронному

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

опроміненні сонячного вітру робить його придатним для космічних застосувань. Питома потужність сонячних елементів є важливим фактором в космічному застосуванні.

Сьогодні *CdTe* є одним з провідних тонкоплівкових фотоелектричних матеріалів завдяки оптимальній ширині забороненої зони 1,5eV для ефективної конверсії сонячного випромінювання, високого оптичного коефіцієнта поглинання та успішного розвитку високоефективних сонячних елементів і модулів. Серед кількох привабливих особливостей, висока хімічна стійкість і проста фазова діаграма є найбільш важливими для виробництва великих площ сонячних модулів *CdTe* в промисловому масштабі.

Незважаючи на те, що значні зусилля були спрямовані на оптимізацію технології виготовлення сонячної батареї *CdTe*, ефективність невеликих сонячних елементів *CdTe* за останні 10 років сягає 15–16,5%, хоча прогнозована ефективність фотоелектричного пристрою на основі цього матеріалу становить близько 30%. У полікристалічних тонких плівках *CdTe* і *CdS* випадкові межі зерен і притаманні їм неоднорідні розміри зерна викликають різні проблеми: такі як нерівномірність кількості матеріалу *CdTe*, ланки шунтування і швидкої поверхневої рекомбінації. Нерівномірність є невід’ємною проблемою в полікристалічних плівках і є однією з причин, які перешкоджають подальшому збільшенню ефективності СЕ.

Метою роботи є поглиблення знань щодо функціонування сонячних елементів різних типів; розробка фотоелектричних пристроїв на легких і гнучких підкладках; оптимізація матеріалу і структури сонячного елемента.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1 СТРУКТУРИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

1.1 Тонкоплівкові кремнієві сонячні елементи на гнучких підкладках

Порівняльна дешевизна сонячних елементів, що утворюються на гнучких підкладках, порівняно з сонячними елементами на склі, пов'язана в першу чергу з можливістю їх виготовлення за допомогою так званого методу "від ролика до ролика" (метод roll-to-roll) – метод рулонного покриття. Крім того, зниження енерговитрат при створенні сонячних елементів на гнучких підкладках порівняно з батареями, сформованими на склі, пов'язане з використанням полімерних підкладок. Тому, незважаючи на те, що в останні роки виробництво тонкоплівкового кремнієвого сонячного елемента, утвореного на скляній підкладці, збільшилося [1], виникла потреба в нових підходах до створення сонячних елементів, що дозволяють значно збільшити продуктивність у виробничих лініях зі значним скороченням витрат. Одним з можливих підходів, що дозволяють вирішити вищеописану проблему, є метод рулонного покриття, який в останні роки успішно використовується і детально досліджений [2]. Однак, щоб конкурувати з "великими площами" фотоелементів, сформованими на скляних пластинах, спосіб виробництва фотоелектричних модулів на основі "рулонного покриття" повинен вирішити ряд проблем, пов'язаних зі зниженням вартості підкладки, технологічної простоти і низької вартості твердої ізоляції. Враховуючи важливість всіх перерахованих вище проблем, пов'язаних з виробництвом "гнучких" сонячних елементів, є сенс вивчити проблеми, пов'язані з низькотемпературним осадженням і послідовністю утворенням структури сонячного елемента. Відзначимо, що процес ізоляції також вимагає дослідження і в даний час додає 50% до ціни "гнучкого" сонячного модуля.

Крім застосувань, пов'язаних зі створенням мереж фотоелектричних систем, зокрема інтегрованих у будівлі, інтерес до фотоелементів на гнучких

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

підкладках збільшується з розвитком автономних систем і орбітальних станцій телекомунікаційних супутників, а також фахівців, що працюють в області електрифікації сільської місцевості в країнах, що розвиваються. Малі літаки, автомобілі та інші споживачі електроенергії можуть отримати частину необхідної енергії від зовнішнього освітлення відкритих поверхонь за допомогою гнучких сонячних елементів. Інше застосування гнучких фотоелектричних систем полягає в інтеграції фотоелектричних систем в невеликих розмірах в одязі та портативних електронних пристроях [3]. У більш широкому сенсі, створення технології інтеграції фотоелектричних систем з гнучким текстильним матеріалом може бути використано для покриття будівель і забезпечення автономного контролю опалення, вентиляції та освітлення будівлі.

Слід зазначити, що «гнучкі» СЕ на основі аморфного кремнію були закладені Ізу та Овшинським у 1984 році, коли вони запропонували сформувати тонкоплівкові сонячні модулі методом «roll-to-roll» на рулонах з нержавіючої фольги. Ця технологія призвела до подальшого створення методу «roll coating» (рулонне покриття). У 1985 році було представлено перші гнучкі сонячні елементи на основі *a-Si*, сформовані на полііміді (ПІ), і обговорили фундаментальні проблеми, пов'язані з тепловим розширенням підкладки та контролем домішок. Ці питання залишаються невирішеними і сьогодні. У 1987 р. створили сонячну комірку *a-Si* на поліетилентерефталатній (ПЕТ) підкладці з ефективністю 9% з використанням методу «ролл-ту-ролл» [4]. Зовсім недавно повідомили про створення одноклітинних сонячних елементів *a-Si* на наноструктурованому ПЕТ зі стабілізованою ефективністю перетворення 8,7%, а також формування двокомпонентного, тандемного, так званого мікроморфа сонячного елемента, що складається з *a-Si* елемента, виконаного на поверхні мікрокристалічного елемента з ефективністю перетворення 10,9% [5]

В даний час розроблені "гнучкі" фотоелектричні елементи, які не використовують технології на основі *a-Si*. Зокрема, є звіти про гнучкі сонячні

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

батареї на основі монокристалічного кремнію з ефективністю перетворення 14,6%. Слід зазначити, що параметри оптимізованих сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію перевищують параметри елементів на основі *a-Si* при середньому рівні інтенсивності освітлення за рахунок більшої ефективності перетворення. У той же час на низькому рівні освітлення – менше 500 лк - сонячні елементи на основі *a-Si* перевершують сонячні елементи на основі *c-Si*. Ефективність перетворення гнучких сонячних елементів на основі структури селеніду-міді-індію-галію (СМІГ), що створювалася на фользі з нержавіючої сталі, досягає 17,4% [6]. Ефективність елементу на основі СМІГ, що утворюються на підкладках ПІ при низькій температурі осадження, знижується до 11% [6]. Повідомлялося про створення гнучких сонячних елементів на основі *CdTe* з ефективністю перетворення 8,6%. До того ж здаються перспективними гнучкі сонячні елементи, засновані на органічному напівпровіднику і так звані сонячні елементи, сенсibilізовані барвниками. Цей тип батареї можна наносити шляхом друку на полімерній плівці. Прикладом певного прогресу в області органічних сонячних батарей є представлення співпрацівниками компанії Vrabes гетеропередачі на об'ємі з ефективністю перетворення 5% [7]. Основними проблемами при створенні органічних сонячних елементів і сонячних елементів, що використовують барвники, є необхідність збільшення поглинання видимого світла шаром для підвищення чутливості і фотохімічної стійкості барвників. Найважливішою проблемою є довговічність використання органічних сонячних елементів.

Окрім необхідності оптимізації матеріалу і структури сонячного елемента у випадку гнучких підкладок, необхідно вирішити проблеми, пов'язані з послідовною зв'язкою окремих сонячних елементів у фотоелектричному модулі. Монолітні рядні з'єднання окремих елементів збільшують потужність фотоелектричних модулів для дешевих фотоелектричних систем. Застосовувана методика лазерного кодування була успішно використана для елементів, що утворюються на високотемпературних скляних підкладках. У той же час ця

технологія відповідає багатьом проблемам у разі її використання для створення панелей на гнучких полімерних плівках, що призводить до збільшення ширини розрізу, а також до проблем, пов'язаних з шунтуванням. Тому була запропонована методика зв'язаних елементів з використанням масок безпосередньо на різних стадіях осадження [8].

Автори представили результати досліджень з оптимізації низькотемпературного осадження сонячних елементів на основі гідрогенізованого кремнію, що складається з аморфного гідрованого кремнію (*a-Si: H*), нанокристалічного кремнію (*nc-Si*) і протокристалічного кремнію (*pc-Si*). У цій же статті автори розробили методику формування клітин послідовно у ситуації, що дозволяє уникнути технології лазерного переписування і переривання процесу осадження у вакуумі.

Автори вивчали сонячні панелі, виготовлені з оптимізованих сонячних елементів, використовуючи *pc-Si*, нанесений на гнучку полімерну підкладку при температурі підкладки $40^{\circ}\text{C} < T_d < 110^{\circ}\text{C}$. Експерименти показали, що у випадку нетекстурованої ПЕТ-фольги для температури підкладки $T_d = 110^{\circ}\text{C}$ ефективність перетворення склала 9% [9]. Сонячний модуль з площею $4 \times 10 \text{ см}^2$, який використовував однокомірну структуру елементу *a-Si* і сформований на поліетиленнафталаті (ПЕН), демонструє ефективність перетворення 3%.

1.2 Сонячні елементи CdTe/CdS на гнучких підкладках

1.1.1 Пристрої на гнучкій металевій фользі

Плівки *CdTe* можуть бути виготовлені різними методами, такими як електрофоретичне осадження (ЕФО), електроосадження (ЕО), обприскування, сублімація в закритому просторі (СЗП), осадження паровим потоком (ОПП), трафаретний друк, електронне просвітлення, лазерна абляція, термічне

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

випаровування, металорганічне хімічне осадження з парової фази і розпилення. Серед цих методів електроосадження саме поширене завдяки простоті та економічності. ОПП підходить для великомасштабного виробництва, а СЗП має перевагу отримання полікристалічних плівок великого розміру зерна. На сьогодні високоефективні фотоелектричні пристрої *CdTe* на скляних підкладках були підготовлені СЗП [10].

Молибден (*Mo*) розглядається як підходящий матеріал підкладки з точки зору відповідного коефіцієнта теплового розширення з *CdTe*. Але різниця в робочих функціях *p-CdTe* і *Mo* зумовлює необхідність проміжного шару між підкладкою *CdTe* і *Mo*, який може дати невідправляючий тунельний контакт. Матеріали, які використовуються для отримання омічного контакту в суперструктурних пристроях *CdTe*, це графітова паста, *Te/Au*, *Sb/Au*, *Ni*, *PbTe*, *SnTe*, *HgTe* і *ZnTe* [11, 12].

1.1.2 Електроосадження *CdTe* на підкладці *Mo*

ЕФО є простою методикою, яка може бути використана для осадження *CdTe* на різних підкладках. Використання матеріалу при електроосадженні дуже високе, оскільки гальванічне покриття відбувається тільки на підкладці. Чистоту плівок покриття можна контролювати за допомогою електроочищення електроліту.

Катодне ЕО *CdTe* для фотоелектричних застосувань було ініційованою роботою компанії Monosloar Inc. у 1976 році та їх субпідрядником університетом Південної Каліфорнії (USC) [13, 14]. До середини 1978 року вони розробили прилад *ITO/CdTe/Te* з ефективністю 1,25%. Перший пристрій на бар'єрі Шоттки *CdTe Au/n-CdTe/ITO*-скло було анансовано в 1980 році, а пізніше ефективність цієї структури Шотткі була покращена до 6% шляхом включення омічного контактного шару *CdS* між *n-CdTe* і *ITO* [15]. Електроосадження пристрою Шотткі на *CdTe* було додатково вдосконалено

промисловою групою Amtek шляхом введення контакту з кадмієм. Перший електроосаджений гетероперехідний сонячний елемент $CdTe/CdS$ був розроблений на початку 1980-х років [16]. Пізніше компанія BP Solar взяла на себе лідируючі позиції для розширення та вдосконалення технології промислового виробництва сонячних елементів.

ЕО $CdTe$ на металевих підкладках простіше і швидше, ніж на підкладках ITO або ITO/CdS . Рівномірні плівки $CdTe$ товщиною близько 2 мкм можна наносити протягом декількох годин, а склад осадженого шару можна контролювати шляхом зміни потенціалу осадження [14; 17]. Цей метод може бути використаний при виготовленні тонкої багатошарової плівки на металевій підкладці, яка може служити в якості низького резистивного контакту між p - $CdTe$ і підкладкою (див. рис.1.1).

Електроосаджена плівка є полікристалічною з сильною переважною орієнтацією мікрозерен вздовж площини (111), але після віджигу величина зерен значно збільшується і орієнтація кристалітів стає випадковою. Плівка n -типу, що осаджується, має опір в діапазоні $10^4 - 10^6$ Ом·см, а композиція є однорідною по всій товщині плівки. Однак еліпсометричний аналіз $CdTe$ /підкладка показав, що зовнішня область має більше Te , ніж Cd [18]. Для застосувань структури концентрація Te в зовнішньому шарі може бути збільшена шляхом нанесення плівки при більш позитивному потенціалі, ніж це потрібно для стехіометричного $CdTe$.

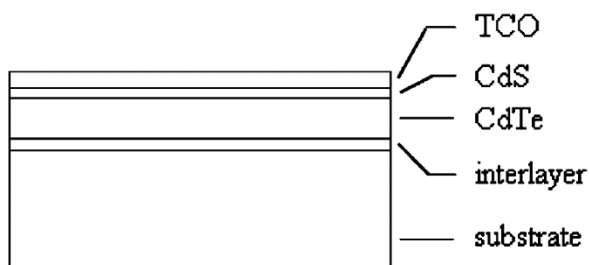


Рисунок 1.1 – Схема пристрою $CdTe/CdS$ на підкладці

1.1.3 Плівки CdTe на підкладках Мо за допомогою СЗП

СЗП – ефективний метод підготовки полікристалічних плівок з зернами відносно великого розміру. Типові експериментальні параметри, які використовуються для отримання плівок хорошої якості, є наступними; температура джерела – 660°C, температура підкладки – 600°C, тиск кисню – 100 Па, тиск гелію – 1500 Па, при часі осадження 3 – 4 хв. Такі сонячні елементи мають проміжний шар *Au/Pd*, нанесений розпиленням. У цих умовах були отримані однорідні плівки товщиною близько 6-8 мкм. Для порівняння, зображення плівок *CdTe* у скануючому електронному мікроскопі (СЕМ), отриманих за допомогою СЗП і ЕФО, показані на рис.1.2. Ясно, що плівки, отримані за допомогою СЗП, більш щільно упаковані, ніж плівки ЕФО.

Незважаючи на те, що СЗП має багато переваг з точки зору часу обробки і фотоелектричних характеристик пристроїв, він накладає обмеження на вибір і можливість застосування проміжного шару, оскільки при високих температурах проміжний шар може дифундувати або розкладатися і може не підходити для зворотного контакту. Ми вивчили різні міжшарові матеріали, і порівняльне дослідження *ZnTe* і *Au/Pd* прошарку показало, що прошарок *Au/Pd* дає низькоомні контакти і підходить для процесу СЗП. Вольт-амперні вимірювання структури *Mo/interlayer/CdTe* показали, що контактний опір значно зменшується з проміжним шаром. При дослідженні використовували тонкі плівки *Cu* і *Te* в якості проміжного шару між *Mo* і термічно випаровувемим *CdTe* і виявили, що контактний опір значно зменшився через введення проміжного шару [19]. У 2001 році група дослідників використовували *ZnTe*, легований азотом, як проміжний шар між *Mo* і *CdTe*, де *CdTe* осідає розпиленням[20].

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

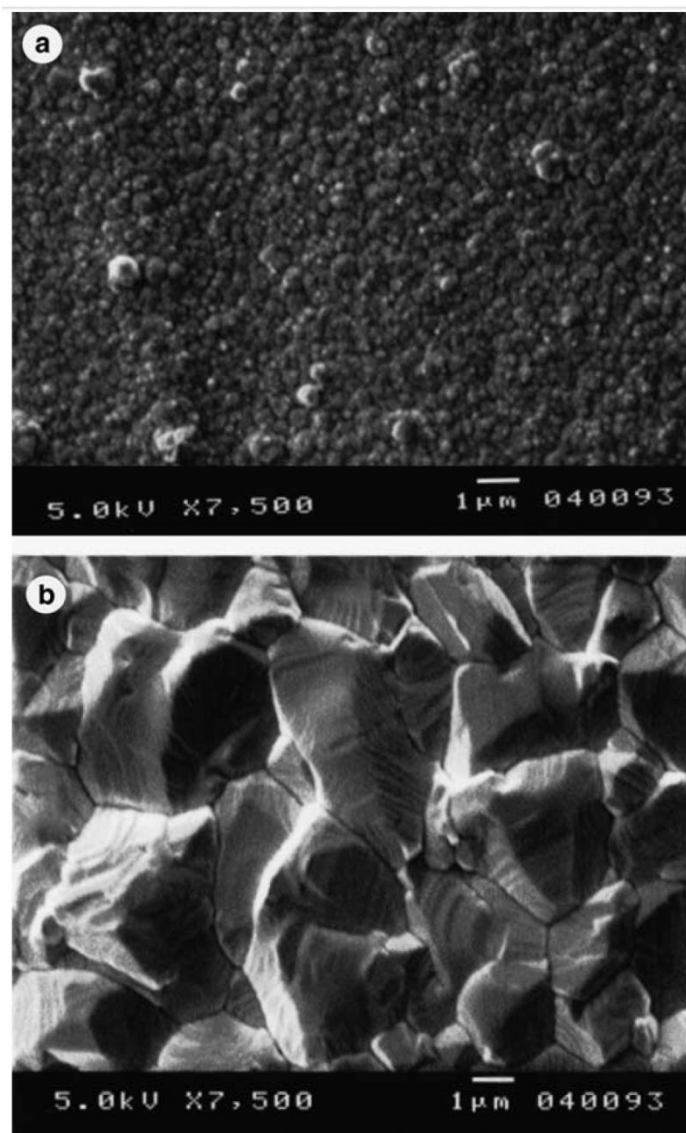


Рисунок 1.2 – СЕМ-зображення плівки $CdTe$, отриманої на гнучкій підкладці молибдену методом: а – ЕФО, б – СЗП

Повідомлялося, що перехід $Mo/CdTe$ значно покращився з проміжним шаром $ZnTe$, але ректифікаційні ефекти все ще спостерігалися. Розробка провідного прошарку між $CdTe$ і металевою підкладкою є областю, яка вимагає найбільшої уваги при розробці фотоелектричних пристроїв на основі металевих підкладок.

1.1.4 Формування гетеропереходу $CdTe/CdS$

Добре відомим партнером гетеросполучення для шару абсорбера $CdTe$ є CdS . CdS може бути нанесений поверх $CdTe$ різними методами, такими як ЕФО, хімічне осадження в бані, термічне випаровування, пироліз пилу і розпилення тощо. У звичайних суперструктурних пристроях на основі скла формування шару CdS набагато легше, він осаджується до осадження $CdTe$. Але в конфігурації підкладки CdS має бути нанесено на грубу поверхню $CdTe$, а властивості $CdTe$ впливають на формування плівки CdS . Серед різних методів осадження CdS виявлено, що термічне випаровування є більш придатним для нанесення CdS поверх $CdTe$ в пристроях для конфігурації підкладки. Але в склопластичних пристроях на основі склопластиків найкращі елементи готуються з нанесеної на хімічну ванну CdS -плівку.

1.1.5 Вплив температури віджигу на фотоелектричні параметри

Були зроблені спроби дослідити вплив постформального віджигу пристрою $CdTe/CdS$ на параметри переходу конфігурації підкладки $CdTe/CdS$ сонячного елемента. Прилади обробляли насиченим розчином $CdCl_2$ в метанолі і віджигали при різних температурах до осадження ITO . На рис.1.3 показано зміни напруги розриву ланцюга V_{oc} і щільності струму короткого замикання J_{sc} пристроїв за рахунок віджигу при різних температурах. Зрозуміло, що температура віджигу пристрою $CdTe/CdS$ впливає як на V_{oc} , так і на J_{sc} . Значення V_{oc} і J_{sc} значно вищі для пристрою віджигу при $400^\circ C$. Спектральна характеристика різних пристроїв показана на рис.1.4, як і очікувалося, спектральна реакція покращується з віджигом і показує залежність від температури. Поведінка пристроїв по відношенню до температури віджигу можна зрозуміти за допомогою аналізу композиційних змін інтерфейсу $CdTe/CdS$ методом Оже-спектроскопії. Конфігурація підкладки є зручною для аналізу інтерфейсу за допомогою Оже-спектроскопії, оскільки перехід є більш доступним, ніж у суперструктурі.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

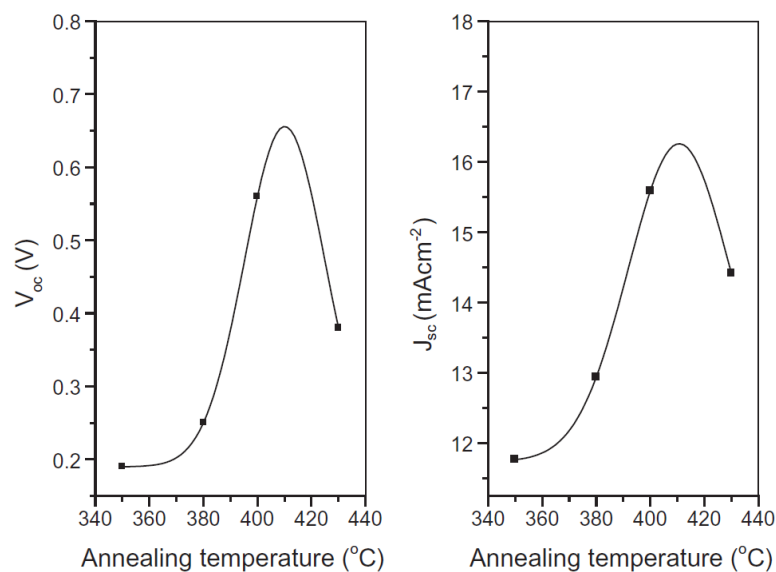


Рисунок 1.3 – Залежність напруги розривного ланцюга (V_{oc}) і густини струму короткого замикання (J_{sc}) від температури віджигу пристрою $CdTe/CdS$. Маркери є експериментальними даними, а лінія є орієнтиром для очей

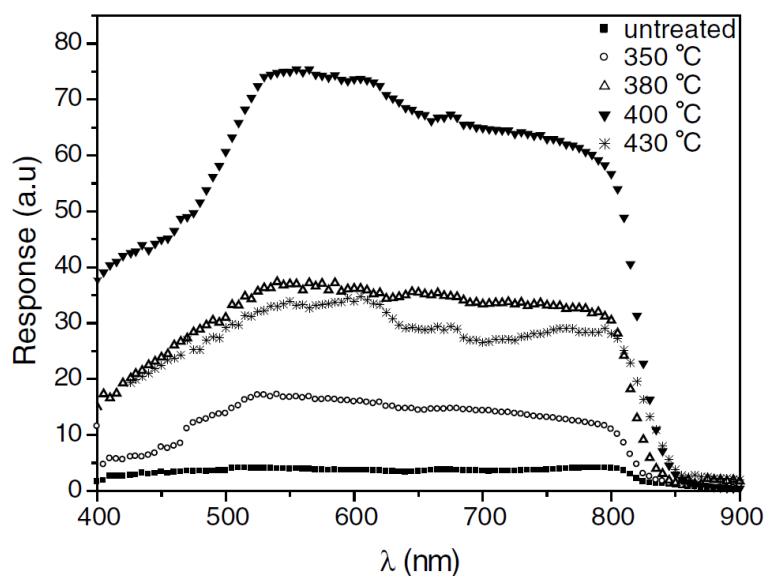


Рисунок 1.4 – Відносний спектральний відгук фотоелектричного пристрою $CdTe/CdS$, розробленого на молібденовій підкладці. Різні криві відповідають відгуками пристрою після віджигу при різних температурах

На рис.1.5 представлений профіль Оже-спектроскопії необробленого пристрою $CdTe/CdS$, при цьому змішування $CdTe$ і CdS відбувається в області приблизно 0,2 мкм, яку можна розглядати як ширину інтерфейсу. На глибині понад 0,4 мкм є присутність сірки (S), яка дифундувала під час осадження CdS з хімічної ванни при 90°C. Спектр Оже-спектроскопії пристрою, який віджигали при 400°C, показаний на рис.1.6. Можна помітити, що віджиг при 400°C викликає взаємну дифузію як Ti , так і S , а також сублімацію S з плівки CdS , зменшуючи ефективну товщину шару CdS . Ширина інтерфейсу більше, ніж у необробленого пристрою. У разі пристроїв, які віджигали при температурі вище 450°C, ширина області інтерфейсу ще більше збільшується, а товщина віконного шару зменшується і, нарешті, зникає, залишаючи збагачену Cd поверхню $CdTe_{1-x}S_x$. Це пояснює спостереження на рис.1.3, де фотоелектричні параметри зменшуються за межі 400°C, що вказує на погіршення роботи пристрою.

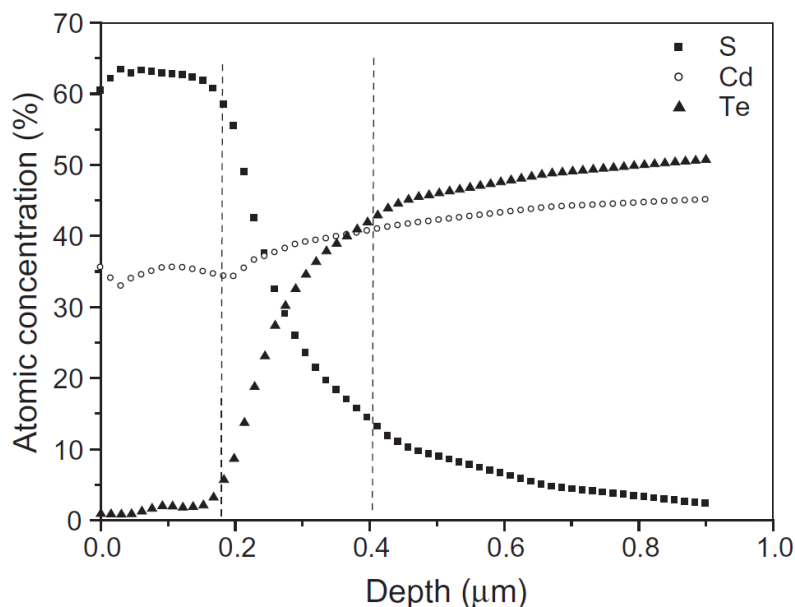


Рисунок 1.5 – Профіль Оже-спектроскопії у ролі депонованого пристрою $CdTe/CdS$

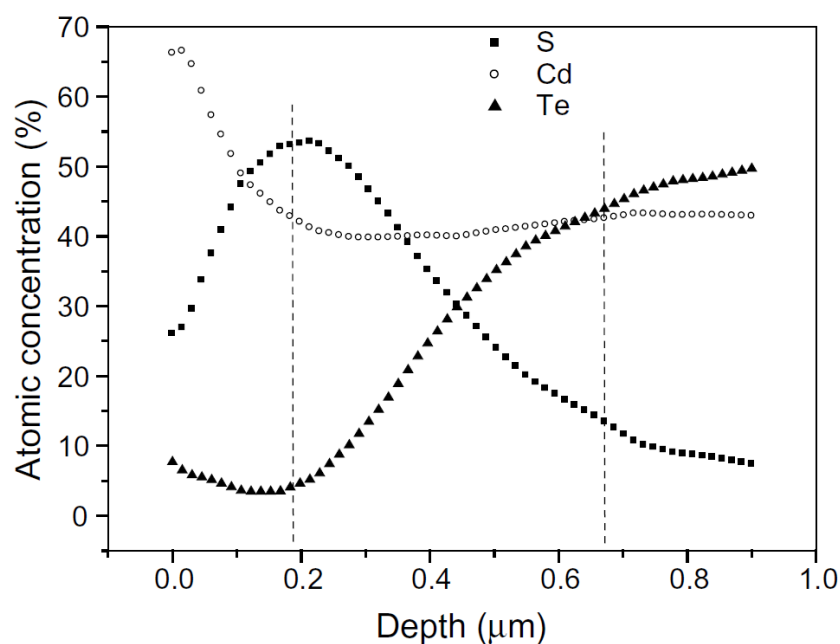


Рисунок 1.6 – Профіль Оже-спектроскопії пристрою $CdTe/CdS$ після віджигу при $400^{\circ}C$

Це погіршення може бути пов'язано зі зміною характеристик з'єднання, а також через втрату матеріалу CdS з поверхні. Віджиг і подальше осадження декількох шарів CdS може забезпечити більш високі температури віджигу і кращу продуктивність для пристрою $CdTe/CdS$. Можна бачити, що в необробленому пристрої є невелика кількість Ti в шарі CdS , який міг дифундувати під час осадження CdS . Концентрація Te в шарі CdS збільшується з температурою віджигу, і можна бачити, що в області кордону розділу (понад $0,2 \mu m$) концентрація Te зменшується з ростом температури, що вказує на те, що більша кількість Te дифундує в область CdS . Віджиг надає подвійного впливу на шар CdS ; S дифундує в обсяг $CdTe$, а також відбувається втрата S з поверхні CdS через сублімації, залишає поверхню, збагачену Cd . Спостережуване поліпшення фотоелектричних параметрів при обробці і віджигу $CdCl_2$ може бути обумовлено поліпшенням шару CdS , пасивацією дефектів, а також поліпшеними властивостями сполуки і зменшенням неузгодженості решітки між $CdTe$ і CdS через взаємну дифузію S і T та утворенням $CdTe_{1-x}S_x$ [21].

1.1.6 Конфігурація суперструктури

Вибір відповідної накладки є вирішальним фактором для гнучких сонячних елементів у суперструктурі, оскільки накладка повинна бути оптично прозорою і повинна витримувати високу температуру обробки. Більшість технологій виготовлення елементів $CdTe/CdS$ вимагають температури в діапазоні 450 – 500°C. Комерційно доступні прозорі полімери не стабільні при таких високих температурах. Поліімідні плівки, такі як Kapton і UpilexTM, можуть витримувати високі температури (~ 450°C), але вони темно-жовті, вони сильно поглинають видиме випромінювання, і, отже, сонячні елементи $CdTe$ на таких комерційно доступних поліімідних плівках дають лише низький струм через великі втрати оптичного поглинання. Але розробка внутрішньо побудованої поліімідної плівки, що має пропускання близько 75%, допомогла отримати пристрої $CdTe/CdS$ у суперструктурній конфігурації з ефективністю 11% [22]. На рис.1.7 наведена схема обробки сонячного елемента на гнучкому полііміді в суперструктурі. Тонкий буферний шар $NaCl$ випарювали на скляній підкладці, а пізніше поліімідний шар обмазували і отверждали при 430°C. Шар PCO осаджували на полііміді методом ВЧ-розпилення. Віконний шар CdS , а також поглинач $CdTe$ готували випарюванням. Завершений пристрій від'єднували від основи скла шляхом розчинення буфера $NaCl$ у воді. Найбільш цікавою перевагою цієї конфігурації є те, що подібне до пристроїв на основі скла омічне формування контакту є останнім етапом у виготовленні пристрою. Сонячні елементи, вирощені на цьому полііміді, виявляють ефективність 8,6% з $ZnO: Al$ і 11% з ITO як передній контакт під освітленням AM1.5 (рис.1.8). Більш низький ККД пристроїв з $ZnO: Al$ в якості переднього контакту пояснювався нестабільністю $ZnO: Al$ під час виготовлення. У випадку пристроїв з ITO в якості фронтального контакту отримані високі значення V_{oc} (842mV) і коефіцієнт заповнення (70,9%), однак J_{sc} був лише близько 18,5 мАсм⁻² (Romeo

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

et al., 2002). Нещодавно сонячні елементи $CdTe/CdS$ з ефективністю 11,3% були безпосередньо вирощені на комерційно доступних фольгах (UpilexTM), що свідчить про те, що можна застосовувати виробництво в рулонах [23].

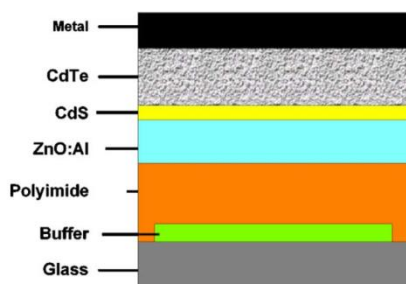


Рисунок 1.7 – Схема обробки сонячного елемента на гнучкому поліімідному аркуші в суперстратній конфігурації з підходом відриву

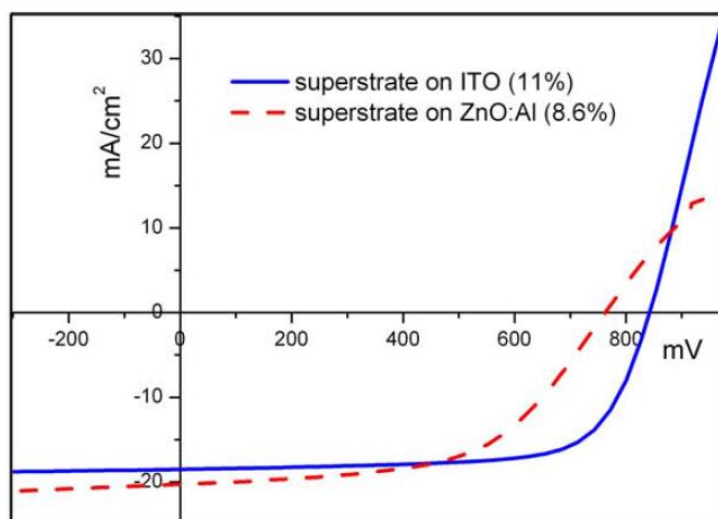


Рисунок 1.8 – Вольт-амперні криві сонячного елемента $CdTe/CdS$, розробленого на гнучкому поліімідному листі в суперструктурній конфігурації

1.1.7 Конфігурація підкладки

Перевагою конфігурації підкладки є те, що полімерна підкладка не повинна бути прозорою. Зазначена сонячна батарея $CdTe/CdS$ на полімерній фользі в конфігурації підкладки виготовляється за новою методикою приготування, яка дозволяє використовувати звичайні полімери. Виробництво пристрою було подібне до процедури, згаданої в попередньому розділі, починаючи з нанесення тонкого шару $NaCl$ на скло. ITO осаджували

безпосередньо на шарі *NaCl*. Шари *CdS* і *CdTe* вирощують HVE над *ITO*. Після обробки осередку тонкий поліїмідний шар (або металеву фольгу) ламінували на зворотному боці пристрою і переднє скло можна було видалити шляхом розчинення *NaCl* у воді. Таким чином, у процесі обробки уникали наявності поліїмідного шару, і в результаті отримували сонячну батарею в конфігурації підкладки. Основною привабливістю такого процесу є те, що скло є підкладкою під час всіх етапів виготовлення, уникаючи температурних проблем, як у випадку поліїмідних або дифузійних питань, як у випадку металевих листів. Сонячні батареї в цій конфігурації мають ефективність 7,3% при фронтівому контакті оксиду олова з фтором і 6% з фронтом контакту оксиду цинку з алюмінієм під освітленням AM1.5 [24]. Низькі значення (49% і 40%) коефіцієнта заповнення пов'язані з низькою стабільністю ПСО на шарі *NaCl*, що означає, що електричні властивості переднього контакту мають тенденцію до погіршення після обробки. Незважаючи на більш низькі значення напруги розімкнутого ланцюга (692mV і 743mV, відповідно для FTO і *ZnO: Al* як переднього контакту) та коефіцієнта заповнення, щільність струму вище, ніж у суперстраничному корпусі (21,6 мАсм⁻² і 20,3 мАсм⁻², відповідно для FTO і *ZnO: Al* в якості переднього контакту) через відсутність поліїмиду на передній частині елемента.

1.2 Гнучкі СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* з високою питомою потужністю

В даний час в космічних і наземних умовах для електропостачання широко використовуються сонячні елементи (СЕ) на основі монокристалічного кремнію. До основних техніко-економічних показників таких сонячних елементів, поряд з коефіцієнтом корисної дії, собівартістю вироблюваної ними електроенергії і ступенем стійкості вихідних характеристик до впливу сонячного випромінювання, відноситься питома потужність. Під питомою потужністю розуміють потужність, що виробляється сонячним елементом на

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

одиницю його ваги (кВт/кг). Показано [25], що якщо собівартість електроенергії, що виробляється сонячними елементами, буде не вище 1 \$ за 1 Ватт·пік (1Вт при інтенсивності сонячного випромінювання 1000Вт/м^2), то фотоелектрика буде конкурентоспроможною по відношенню до електроенергії, що виробляється тепловими електростанціями. До 2010 року мінімально можлива ціна 1 Ватт·пік кремнієвих монокристалічних сонячних елементів складе не менше 2 \$, а для плівкових сонячних елементів на основі телуриду кадмію – 0,5 \$ [25]. Дослідження показали [26], що найбільшу стійкість к.к.д. до радіаційного впливу космічних умов мають тонкоплівкові сонячні елементи на основі телуриду кадмію. Традиційно високоефективні тонкоплівкові сонячні елементи на основі *CdTe* виготовляються на скляних підкладках вакуумними методами при температурах не менше 400°C (див., Наприклад, в [27]). Такі сонячні елементи, незважаючи на економічність і радіаційну стійкість істотно поступаються СЕ на основі монокристалів кремнію за питомою потужністю. В даний час ряд західних фірм почали виробляти прозорі поліамідні плівки, що володіють термостабільністю до 450°C . Це дозволяє формувати ефективні гнучкі сонячні елементи на основі телуриду кадмію. Такі гнучкі сонячні елементи теоретично здатні володіти високою питомою потужністю за рахунок істотного зниження їх ваги при заміні скляної підкладки на поліамідну плівку. Таким чином, порівняльні експериментальні дослідження ефективності, вихідних параметрів і наведеної потужності тонкоплівкових сонячних елементів на основі телуриду кадмію виготовлених на скляних підкладках і поліамідних плівках є актуальними.

1.2.1 Методика отримання і дослідження зразків

Для отримання лабораторних зразків СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* спочатку на поліамідні плівки і скляні підкладки методом нереактивного високочастотного магнетронного розпилення осаджувалися шари *ITO*. Осадження здійснювалося

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

в промисловій установці MRC 6031. При розпилюванні використовувався мішень, що представляла собою спресовану механічну суміш порошків In_2O_3 (90% маси) і SnO_2 (10% маси) напівпровідникової чистоти. Початковий парціальний тиск був 10^{-6} Торр. Формування *ITO* товщиною (0,4 – 0,5) мкм здійснювалося в аргонно-кисневій суміші при тиску $6 \cdot 10^{-3}$ Торр. Концентрація кисню в складі газової суміші підтримувалася на рівні 3% об. Питома потужність магнетрона становила 1500 Вт/см². Температура підкладки – 400°C. Ці режими магнетронного розпилення були ідентифіковані нами для осадження шарів *ITO* з оптимальними оптикоелектричними властивостями на скляних підкладках і поліамідних плівках.

На шари *ITO* термічним випаровуванням осаджувалися плівки *CdS* при тиску 10^{-6} мм.рт.ст. і температурі підкладки 3000°C. Потім без порушення вакууму при температурі підкладки 400°C осаджувалися плівки *CdTe*. Отримані гетеросистеми *ITO/CdS/CdTe* піддавалися «хлоридній» обробці [28]. Для цього на шари *CdTe* без нагріву підкладки, термічним випаровуванням при тиску 10^{-6} мм.рт.ст. наносилися плівки *CdCl₂*. Отримані гетеросистеми *ITO/CdS/CdTe/CdCl₂* піддавалися віджигу на повітрі в закритому об'ємі при температурі 4300°C протягом 25 хвилин. Після травлення гетеросистем, які попередньо віджигались, в розчині бром метанолу на їх поверхні термічним випаровуванням наносилися двошарові електричні контакти *Cu-Au* і потім проводився віджиг сформованих СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на повітрі при температурі 200°C протягом 30 хвилин.

Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* здійснюється в режимі стандартних спектральних умов освітлення АМ1.5. За експериментальними світловими вольт-амперними характеристиками визначаються вихідні параметри сонячних елементів: щільність струму короткого замикання ($J_{\text{кз}}$), напруга холостого ходу ($U_{\text{хх}}$), фактор заповнення (FF) навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) і коефіцієнт корисної дії (η) [29]:

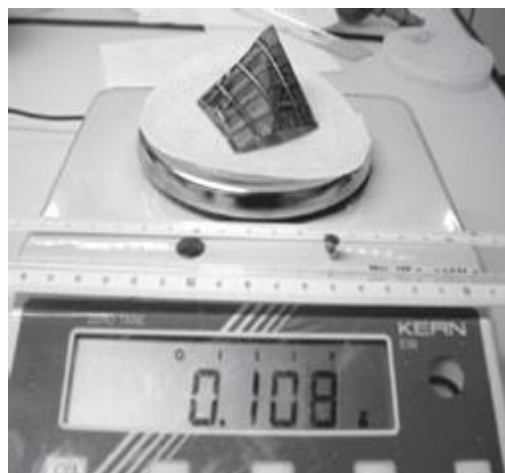
					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta = J_{\text{кз}} \cdot U_{\text{хх}} \cdot FF / P_{\text{и}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{и}} = 100 \text{ мВт/см}^2$ – потужність падаючого сонячного випромінювання.



а)



б)

Рисунок 1.9 – Сонячні елементи *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au*: а) на скляній підкладці; б) на поліамідної плівці.

1.2.2 Результати і їх обговорення

СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на поліамідних плівках були в 56 разів легше за такі ж СЕ на скляних підкладках. Для встановлення найбільш оптимальних конструктивно-технологічних рішень вивчено вплив товщини плівок сульфїду кадмію і товщини плівок хлориду кадмію. Згідно з літературними даними [30], для тонкоплівкових СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au*, в яких осадження базового шару здійснюється вакуумним випаровуванням, оптимальна товщина *CdTe* становить 4 мкм. Тому при формуванні СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* товщина плівок телуриду кадмію також вибиралась 4 мкм.

На рис.1.10 та рис.1.11 порівняно результати виміру світлових вольт-амперні характеристик СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на скляних підкладках і поліамідних плівках.

Видно, що на скляних підкладках при товщині шару сульфїду кадмію 0,40 мкм і товщині шару хлориду кадмію 0,35 мкм спостерігається максимальна

ефективність СЕ – 10,3%. При цьому спостерігається напруга холостого ходу $U_{xx} = 774$ мВ, щільність струму короткого замикання $J_{кз} = 20,1$ мА/см², фактор заповнення світлової вольт-амперної характеристики $FF = 0,660$ (рис.1.10,а, крива 2). Зниження товщини шару сульфід кадмію від 0,40 мкм приводить до зниження ефективності СЕ, в основному, за рахунок зменшення фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики. Так, наприклад, зменшення товщини шару CdS від 0,40 мкм до 0,20 мкм, при незмінній товщині шару хлориду кадмію 0,35 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 8,2\%$. При цьому фактор заповнення світлової вольт-амперної характеристики зменшується від $FF = 0,660$ до $FF = 0,558$ (рис.1.10,а, криві 1,2). Збільшення товщини шару сульфід кадмію понад 0,40 мкм приводить до зниження ефективності за рахунок зменшення щільності струму короткого замикання. Так, наприклад, збільшення товщини шару CdS від 0,40 мкм до 0,60 мкм, при незмінній товщині хлориду кадмію 0,35 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 8,8\%$. При цьому щільність струму короткого замикання зменшується від $J_{кз} = 20,1$ мА/см² до $J_{кз} = 17,0$ мА/см² (рис.1.10,а, криві 1, 3).

Зниження товщини шару хлориду кадмію при проведенні "хлоридної" обробки СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ (рис.1.10,б), які були сформовані на скляних підкладках, від 0,35 мкм приводить до зниження ефективності за рахунок зменшення напруги холостого ходу і фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики. Так, наприклад, зменшення товщини шару $CdCl_2$ від 0,35 мкм до 0,06 мкм, при незмінній товщині шару сульфід кадмію 0,40 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 7,4\%$.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

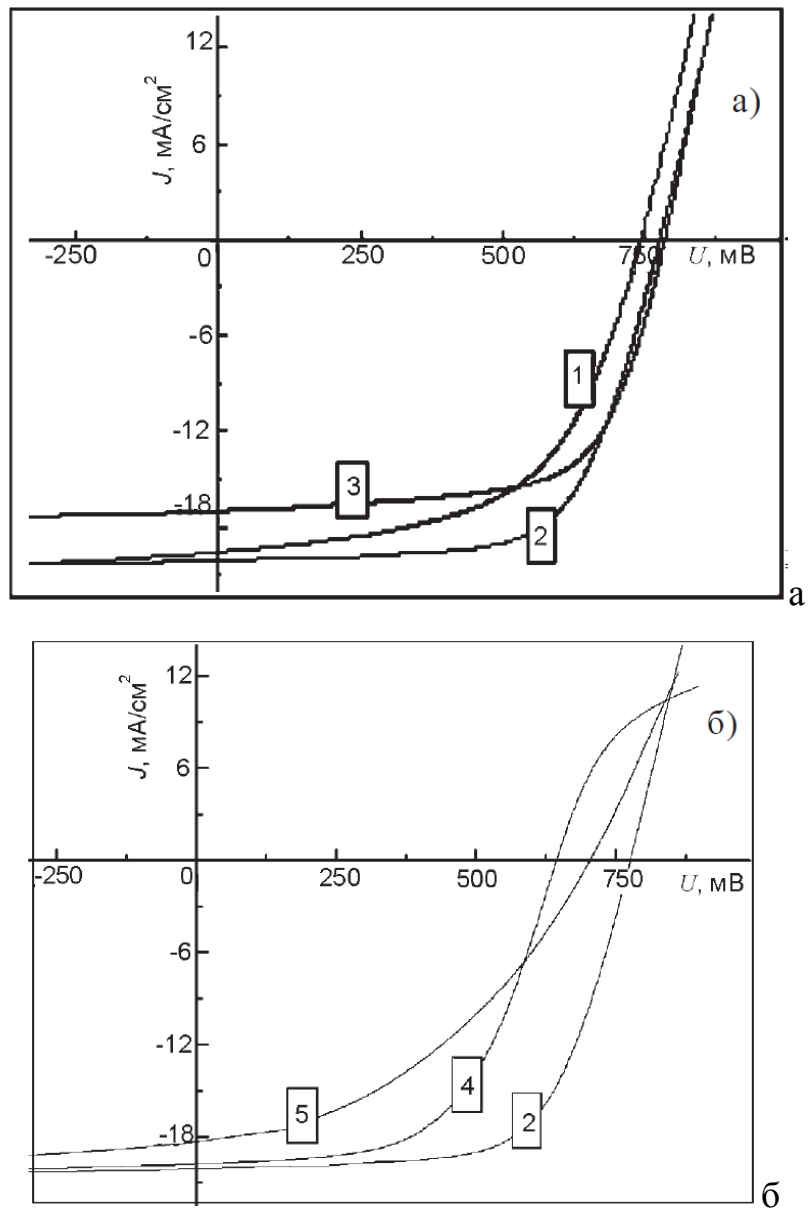


Рисунок 1.10 – Світлові ВАХ СЕ *ITO/CdS/CdTe/ Cu/Au* на скляних підкладах:

а) вплив товщини шару *CdS* ($d_{CdCl_2} = 0,35$ мкм): 1 – $d_{CdS} = 0,20$ мкм: $U_{xx} = 749$ мВ, $J_{кз} = 19,7$ мА/см², FF = 0,558, $\eta = 8,2\%$; 2 – $d_{CdS} = 0,40$ мкм: $U_{xx} = 774$ мВ, $J_{кз} = 20,1$ мА/см², FF = 0,660, $\eta = 10,3\%$; 3 – $d_{CdS} = 0,60$ мкм: $U_{xx} = 783$ мВ, $J_{кз} = 17,0$ мА/см², FF = 0,660, $\eta = 8,8\%$.

б) вплив товщини шару *CdCl₂* ($d_{CdS} = 0,40$ мкм): 4 – $d_{CdCl_2} = 0,06$ мкм: $U_{xx} = 640$ мВ, $J_{кз} = 19,8$ мА/см², FF = 0,583, $h = 7,4\%$; 2 – $d_{CdCl_2} = 0,35$ мкм: $U_{xx} = 774$ мВ, $J_{кз} = 20,1$ мА/см², FF = 0,660, $\eta = 10,3\%$; 5 – $d_{CdCl_2} = 1,20$ мкм: $U_{xx} = 713$ мВ, $J_{кз} = 18,3$ мА/см², FF = 0,410, $\eta = 5,4\%$.

При цьому напруга холостого ходу зменшується від $U_{xx} = 774\text{мВ}$ до $U_{xx} = 640\text{мВ}$, фактор заповнення – від $FF = 0,660$ до $FF = 0,568$, (рис.1.10,б, крива 2, 4). Зростання товщини шару хлориду кадмію понад 0,35 мкм приводить до зниження ефективності, в основному, за рахунок зменшення фактора заповнення. Так, збільшення товщини шару CdCl_2 від 0,35 мкм до 1,2 мкм, при незмінній товщині шару сульфід кадмію 0,35 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 5,4\%$. При цьому фактор заповнення світловий вольт-амперної характеристики зменшується від $FF = 0,660$ до $FF = 0,410$ (рис.1.10,б, криві 2, 5).

Варіювання товщини плівок сульфід кадмію і хлориду кадмію при виготовленні СЕ на поліамідних плівках показало, що при товщині шару сульфід кадмію 0,55 мкм і товщині шару хлориду кадмію 0,11 мкм спостерігається максимальна ефективність – 8,5%. При цьому напруга холостого ходу $U_{xx} = 746\text{ мВ}$, щільність струму короткого замикання $J_{кз} = 19,3\text{ мА/см}^2$, фактор заповнення світлової вольт-амперної характеристики $FF = 0,591$ (рис.1.11,б, крива 4). Питома потужність такого гнучкого СЕ становить 1,9 кВт/кг. Зіставлення максимально досягнутих питомих потужностей СЕ, сформованих на поліамідній плівці і скляній підкладці, свідчить про те, що наведена потужність гнучкого сонячного елемента вище в 47 разів.

Зниження товщини шару сульфід кадмію від 0,55 мкм, при виготовленні СЕ на поліамідних плівках, призводить до зниження ефективності за рахунок зменшення напруги холостого ходу. Так, зменшення товщини шару CdS від 0,55 мкм до 0,30 мкм, при незмінній товщині хлориду кадмію 0,08 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 6,3\%$ до $\eta = 4,2\%$.

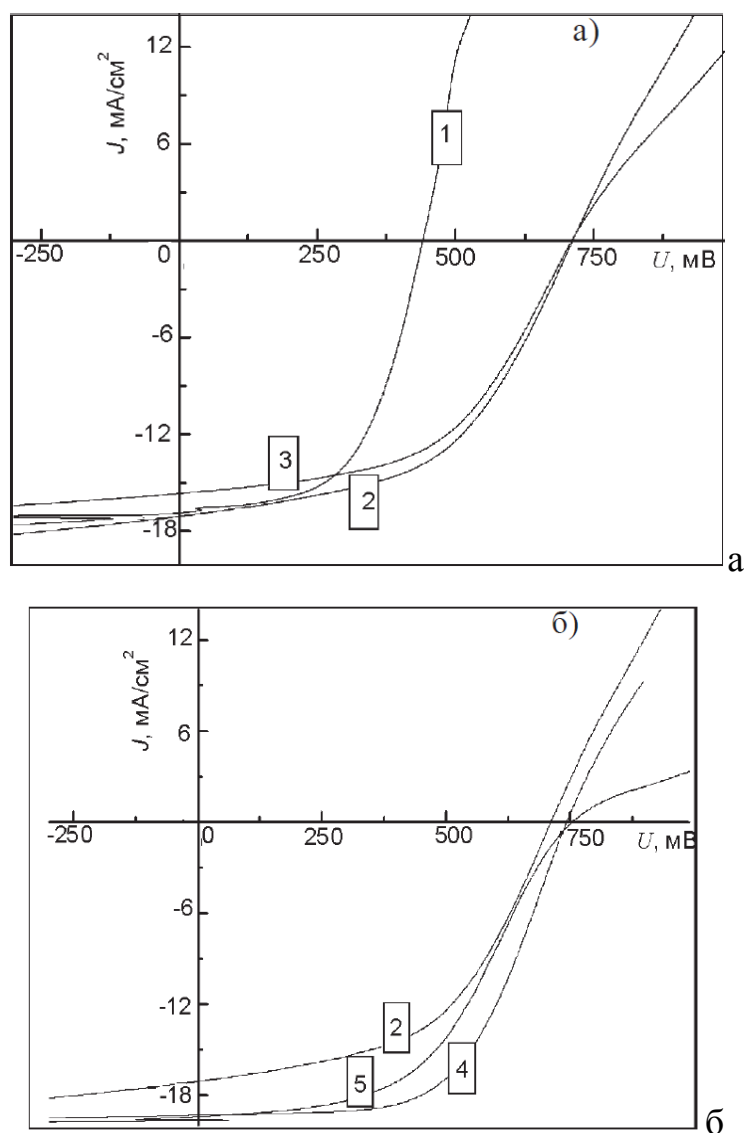


Рисунок 1.11 – Світлові ВАХ СЕ *ITO/CdS/CdTe/ Cu/Au* на поліамідних плівках: а) вплив товщини шару *CdS* ($d_{CdCl_2} = 0,08$ мкм): 1 – $d_{CdS} = 0,30$ мкм: $U_{xx} = 440$ мВ, $J_{K3} = 16,9$ мА/см², $FF = 0,568$, $\eta = 4,2\%$; 2 – $d_{CdS} = 0,55$ мкм: $U_{xx} = 712$ мВ, $J_{K3} = 17,1$ мА/см², $FF = 0,514$, $\eta = 6,3\%$; 3 – $d_{CdS} = 0,70$ мкм: $U_{xx} = 711$ мВ, $J_{K3} = 15,7$ мА/см², $FF = 0,490$, $h = 5,8\%$.

б) вплив товщини шару *CdCl₂* ($d_{CdS} = 0,55$ мкм): 2 – $d_{CdCl_2} = 0,08$ мкм: $U_{xx} = 712$ мВ, $J_{K3} = 17,1$ мА/см², $FF = 0,514$, $\eta = 6,3\%$; 4 – $d_{CdCl_2} = 0,11$ мкм: $U_{xx} = 746$ мВ, $J_{K3} = 19,3$ мА/см², $FF = 0,591$, $h = 8,5\%$; 5 – $d_{CdCl_2} = 0,16$ мкм: $U_{xx} = 756$ мВ, $J_{K3} = 19,4$ мА/см², $FF = 0,490$, $\eta = 7,2\%$.

При цьому напруга холостого ходу зменшується від $U_{xx} = 712$ мВ до $U_{xx} = 440$ мВ (рис.1.11,а, криві 1, 2). Збільшення товщини шару сульфід кадмію в гнучких сонячних елементах на основі $CdTe$ понад оптимального значення, як і для СЕ сформованих на скляних підкладках, призводить до зниження ефективності за рахунок зменшення щільності струму короткого замикання. Так, наприклад, збільшення товщини шару CdS від 0,55 мкм до 0,70 мкм, при незмінній товщині хлориду кадмію 0,08 мкм, призводить до зниження ефективності гнучкого СЕ від $\eta = 6,3\%$ до $\eta = 5,6\%$. При цьому щільність струму короткого замикання зменшується від $J_{кз} = 17,1$ мА/см² до $J_{кз} = 14,7$ мА/см² (рис.1.11,а, криві 1, 3). Можна припустити, що в обох конструкціях СЕ спостерігається експериментально зниження $J_{кз}$ обумовлено зниженням щільності потоку фотонів, що надходять в базовий шар при збільшенні товщини шару CdS .

Зниження товщини шару хлориду кадмію при проведенні "хлоридної" обробки сонячних елементів, сформованих на поліамідних плівках від 0,11 мкм приводить до зниження ефективності за рахунок зменшення всіх вихідних параметрів СЕ. Так, зменшення товщини шару $CdCl_2$ від 0,11 мкм до 0,08 мкм, при незмінній товщині сульфід кадмію 0,55 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 8,5\%$ до $\eta = 6,3\%$. При цьому напруга холостого ходу зменшується від $U_{xx} = 746$ мВ до $U_{xx} = 721$ мВ, фактор заповнення – від $FF = 0,590$ до $FF = 0,514$, щільність струму короткого замикання – від $J_{кз} = 19,3$ мА/см² до $J_{кз} = 17,1$ мА/см² (рис.1.11,б, криві 2, 4). Зростання товщини шару хлориду кадмію при формуванні гнучких сонячних елементів понад оптимального значення, як і для СЕ сформованих на скляних підкладках, призводить до зниження ефективності в основному за рахунок зменшення фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики. Так, збільшення товщини шару $CdCl_2$ від 0,11 мкм до 0,16 мкм, при незмінній товщині сульфід кадмію 0,55 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 8,5\%$ до $\eta = 7,2\%$ (рис.1.11,б, криві 2, 5).

1.3 Багатофункціональні тонкоплівкові сонячні елементи на гнучких підкладках для космічної енергії

Концепції майбутніх космічних платформ включають як дуже великі супутники, такі як супутник сонячної енергії (CSE), так і дуже малі супутники; [31, 32] довгострокові плани передбачають рої розподілених, автономних, малих супутників, які називаються мікросатами або навіть наносатами. Технологія сонячного електричного двигуна (СЕД), яка використовує двигун прискорений іонами, була успішно продемонстрована в Deep Space 1. [32]

Фотоелектричні масиви продовжуватимуть залишатися ключовим джерелом для виробництва електроенергії в просторі. Незважаючи на те, що технології Si та GaAs фотоелектрики продовжують відігравати життєво важливу роль у просторі, існують дві області, в яких вимагається поліпшення: масова питома потужність (МПП) або співвідношення потужності/ваги та випромінювання. Обидва матеріали страждають в цьому відношенні, оскільки вони засновані на кристалічних матеріалах, і Si обмежується ефективністю одного з'єднання. Сонячні батареї на основі тонкоплівкових матеріалів пропонують набагато більш високу МПП і значно меншу вартість. Однак для космічних застосувань може знадобитися 15% або більше ефективності у нульовій атмосфері (q). [33] Провідні тонкоплівкові матеріали – аморфні Si , $CuInSe_2$ і $CdTe$ в останні десятиліття спостерігали значні досягнення в ефективності. Кінцевою метою тонкоплівкової програми НАСА ДЦГ є розробка 20% тонкоплівкових пристроїв у нульовій атмосфері з високим коефіцієнтом потужності/ваги.

У той час як нинішні одношарові тонкоплівкові елементи ефективно конкурують з кремнієвими, у виробництві знаходяться тандемні пристрої, які пропонують значно вищу ефективність. Ці тандемні пристрої більш ефективно

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

використовують сонячне випромінювання шляхом перетворення більш короткого випромінювання в верхньому широкополосному шарі і проходження довгохвильового світла, що не було поглинуто, до важкодосяжного рівня підкладки елемента. МПП може бути додатково підвищений за рахунок використання тонких, легких, металевих фольг або навіть високотемпературних пластмас, таких як полііміди. Тонкоплівкові пристрої принципово більш стійкі до радіації, тому що їхня товщина менша, це також справедливо для тонкоплівкових тандемів.

Ми запропонували і змодельовали тонкоплівкову структуру тандемних пристроїв, яка може відповідати цілям програми. Нижня комірка – це прилад СМІГ 1.0 eV (вимоги до ефективності цього пристрою були продемонстровані).[34] Однак не існує відомого пристрою, що відповідає вимогам верхньої комірки. Основними вимогами є: ширина забороненої зони в діапазоні 1,6-2,0 eV, ефективність 16-18% і прозорість для передачі довгих хвиль до нижньої комірки. Безпосередньою метою є розвиток такого елемента. Показано результати моделювання та обробки пристроїв багат шарової програми НАСА ДЦГ.

1.4 Висновки до розділу

Розробка сонячних елементів *CdTe* на гнучких підкладках почалася лише нещодавно, незважаючи на те, що були досягнуті обнадійливі результати. Прилади на металевих підкладках показали ефективність лише на 7,8%, а основні питання, які необхідно вирішити при розробці пристроїв *CdTe/CdS* на металевій підкладці, – це (1) омичний контакт між *CdTe* і субстратом, (2) розвиток партнера гетеросполучення *CdS* на поверхні *CdTe*, (3) вплив постформацийних теплових обробок на шар *CdS* та (4) осадження шару ПСО. Проблема омичного контакту може бути вирішена шляхом нанесення на металеву підкладку p^+ прошарку до осадження *CdTe*, який може діяти як

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

тунельний контакт. Розробка шару CdS різними методами потребує систематичного дослідження та ретельної оцінки результатів. У звичайних пристроях на скляній основі шар CdS стає більш стійким до дифузії Te шляхом віджигу після осадження в $CdCl_2$. Але в конфігурації субстрату завжди відбувається дифузія Te в шар CdS , і будь-який постформаційний віджиг переходу ще більше сприяє цій дифузії. У суперструктурних пристроях ПСО розвиток є першим кроком, але в конфігурації субстрату це останній крок. Метод осадження ПСО впливає на характеристики переходу $CdTe/CdS$.

Цікавим є розвиток сонячних елементів на полімерних підкладках, але погано, що щільність струму низька через поглинання світла в полімері. Відсутність прозорого полімеру, стабільного при високій температурі обробки $CdTe$, є перешкодою в цьому напрямку. Найбільш висока ефективність гнучкого сонячного елемента $CdTe/CdS$ на полімерній підкладці становить 11,3%. Ця ефективність добре порівнюється з ефективністю сонячних елементів СМІГ або $a-Si$, розроблених на полімерній фользі. Використання дуже тонких поліїмідних плівок і низькотемпературний ($<450^{\circ}C$) процес може зменшити поглинання світла в полімері і проблеми стійкості підкладки.

Шляхом порівняльних досліджень СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$, сформованих на скляних підкладках і поліамідних плівках, доведено, що заміна скляної підкладки поліамідної плівкою дозволяє збільшити питому потужність таких сонячних елементів в 47 разів.

Визначено товщину шару сульфідів і хлориду кадмію, при яких спостерігається максимальне значення ефективності СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ отриманих методом термічного вакуумного осадження. Показано, що оптимальна товщина шару сульфідів кадмію в конструкції СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ сформованому на поліамідних підкладках більша, ніж при використанні скляних підкладок, а товщина шару хлориду кадмію – менша. Механізм зниження ефективності при збільшенні товщини шару сульфідів кадмію і хлориду кадмію понад оптимальних значень для обох типів сонячних

елементів однаковий і обумовлений зниженням щільності струму короткого замикання і зменшення фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики відповідно.

Визначена експериментально максимальна ефективність СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на скляних підкладках склала 10,3%, а для гнучких СЕ – 8,5%. Більш висока ефективність СЕ сформованих на скляних підкладках, в першу чергу, обумовлена великим фактором заповнення світлової вольт-амперної характеристики.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

2 РОЗРОБКА ТОНКОПЛІВКОВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ГНУЧКИХ ПІДКЛАДКАХ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ ПАРАМЕТРІВ

2.1. Вибір оптимального шару для формування СЕ на гнучкій підкладці

Передбачається, що оптимальним матеріалом для поглинаючого шару кремнієвих сонячних елементів є протокристалічний нелегований кремній (*pc-Si*), який перевершує електронні параметри порівняно з *a-Si* і *nc-Si*. *Pc-Si* є єдиним найкращим матеріалом при використанні низьких температур підкладки $T_d < 100^\circ\text{C}$ для отримання тонкоплівкових сонячних елементів на основі *Si*. У той же час, якщо $T_d > 100^\circ\text{C}$ параметри сонячного елемента поліпшуються переходом від *a-Si* до *pc-Si* при формуванні світлопоглинаючого шару. Протокристалічний кремній є матеріалом, який утворюється в умовах процесу на границі переходу для формування *a-Si* і *nc-Si*. Тому його структура складається з аморфної кремнієвої матриці, що містить дискретні включення нанокристалічного кремнію. Таким чином, об'ємна частка нанокристалічної фази X_c в *pc-Si* близька до нульового контрасту з *nc-Si*.

Протокристалічний кремній був результатом експериментів по оптимізації активного шару тонкоплівкових клітин на основі *Si* і *SiGe*, що призвело до створення структурномодифікованого матеріалу, званого протокристалічним кремнієм. Огляд структурних властивостей матеріалу, що містить неконтрольовані концентрації нанокристалів кремнію, проведений в роботі. Основною метою формування сонячної батареї на основі *pc-Si* є вибір умов процесу, які можуть утворювати нанокристали кремнію в аморфній матриці, які не контактують один з одним.

Формування і збільшення концентрації нанокристалів в матеріалі залежить від температури осадження, частки водню в воднево-силані, газової суміші та товщини плівки [35]. Результат визначається досить вузьким діапазоном параметрів процесу, що забезпечують *pc-Si*. Якщо в процесі не

використовуються фторовані або хлоровані гази [36], то, як правило, об'ємна частка нанокристалічної фази зростає з товщиною плівки [35, 37].

Формування *pc-Si* вимагає великої частки водню в газовому середовищі з використанням методу плазмохімічного осадження з парової фази (МПХО) або іншого газофазного методу (ХОПФ), наприклад, методом термічного осадження з парової фази (ХОПФ). Збільшення відносної частки водню у воднево-силановій газовій суміші $R = [H_2]/[SiH_4]$ призводить до різкої зміни властивостей оптоелектронних матеріалів у R-області від 15 до 50. Оптимальне значення R, необхідне для отримання *pc-Si*, залежить від температури підкладки T_d і геометрії реакційної камери, в якій відбувається осадження матеріалу [39].

Залежність від R оптоелектронних властивостей плівок, отриманих МПХО при $T_d = 40^\circ C$ і $T_d = 75^\circ C$, вивчалася в [38] з метою аналізу властивостей умов формування плівки, які допомагають осадженню Si на гнучку дешеву ПЕТ-підкладку при низьких температурах ($T_d < 100^\circ C$). Pс-Si плівки, що утворюються в перехідній області від a-Si до nc-Si показали оптоелектронні властивості, які перевершують відповідні властивості a-Si і nc-Si. Результати показані на рис.2.1. Вимірювання фоточутливості (відношення фотопровідності до темної провідності) проводили при освітленні плівок світлом з енергіями фотонів $h\nu = 1,96$ eV та інтенсивністю $1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Товщина плівок становила ≈ 1 мкм. Швидкість осадження плівок суттєво зменшилася зі збільшенням R.

Як видно, віджиг призводить до збільшення фоточутливості плівок, обумовлених, мабуть, перерозподілом водню в структурі a-Si і pc-Si. При цьому плівки, отримані при $R = 29$ ($T_d = 75^\circ C$) і $R = 45$ ($T_d = 40^\circ C$), демонструють не тільки найвищу фоточутливість, але і кращу стабільність параметрів при світловому впливі.

Кох і його колеги [38], і Ісікава і Шуберт [9] продемонстрували, що створення нелегованого *pc-Si* при температурах підкладки $40^\circ C < T_d < 110^\circ C$ з

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

хорошими оптоелектронними властивостями і фоточутливістю (більше 10^5) вимагає відповідного відбору R і плазмового розряду з досить високою частотою.

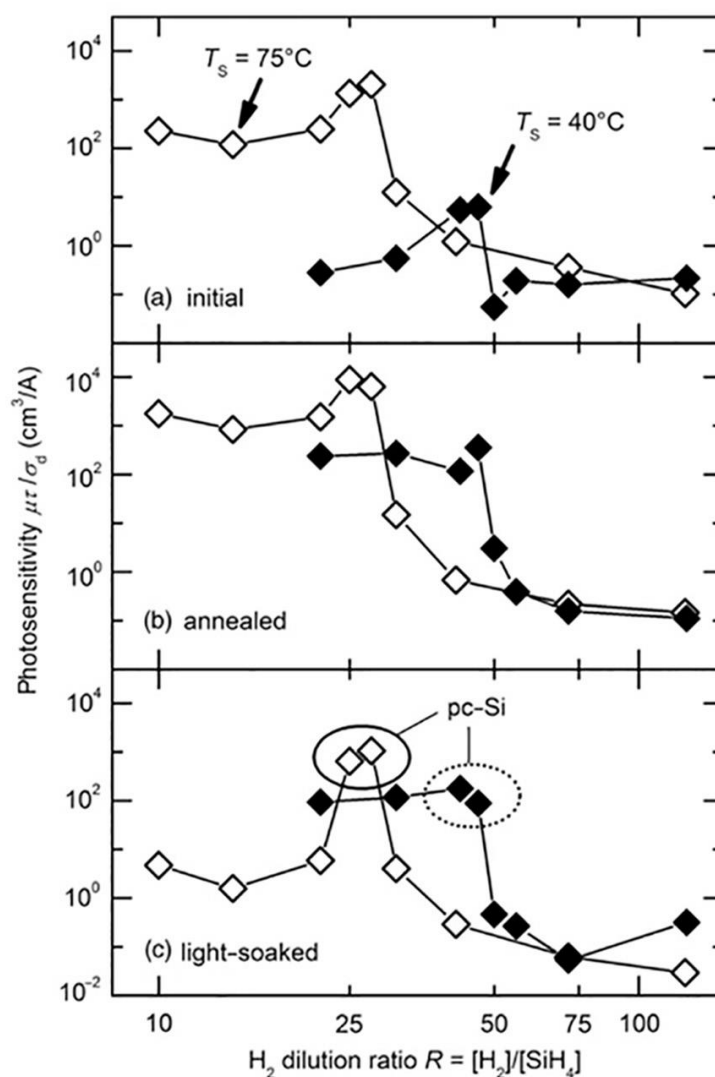


Рисунок 2.1 – Залежність фоточутливості плівок від $T_d = 40^\circ\text{C}$ і $T_d = 75^\circ\text{C}$ за R. Дані показують результати вимірювань, зроблених відразу після приготування плівок (а) після віджигу плівки при 110°C . С протягом 16 годин (б) після освітлення плівки при $T < 50^\circ\text{C}$ з інтенсивністю світла АМ 1,5 протягом 100 годин (с) [1]

2.2 Формування легованих шарів для СЕ на гнучких підкладках

Необхідність використання низькотемпературної підкладки ($T_d < 100^\circ\text{C}$) у разі формування сонячного елемента на дешевій гнучкій фользі ПЕТ виникають проблеми отримання легованих шарів, пов'язані з низькою ефективністю легування $a\text{-Si}$ при низьких температурах [40]. Автори [41] порівнювали параметри плівок $a\text{-Si}$ і $nc\text{-Si}$, отриманих методом високочастотного плазмохімічного осадження, і методом «гарячого дроту» при температурах підкладки $T_d = 25^\circ\text{C}$ і $T_d = 100^\circ\text{C}$ і леговані донором (n-тип) або акцепторами (p-типу). Була відзначена монотонна зміна структури від аморфного до нанокристалічного зі збільшенням R у випадку методу "гарячого дроту" і різка зміна структури в разі "високочастотного методу". Крім того, спостерігалось значне підвищення ефективності легування плівок після віджигу при 300°C , що призвело до збільшення провідності плівок $a\text{-Si}$ на два порядки [42].

Кох виявив значне зменшення (на чотири порядки) провідності плівок $a\text{-Si}$ n-типу, коли температура підкладки зменшується від $T_d = 150^\circ\text{C}$ до $T_d = 100^\circ\text{C}$ у разі високочастотного плазмового методу хімічного осадження. Дослідження показали, що проблема високої концентрації дефектів і низька ефективність легування може бути подолана у випадку силано-водневої суміші з $R > 3$ [38]. Таким чином можна підвищити провідність плівки n-типу, отриманої при $T_d = 100^\circ\text{C}$, до значення $5 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. На відміну від матеріалу n-типу, у випадку матеріалу p-типу проблема отримання легової плівки $a\text{-Si}$ або $pc\text{-Si}$ при низькій температурі підкладки вимагає розчинів.

На рис.2.2 представлені результати вимірювань провідності та фотопровідності плівок n- і p-типу, виконаних при низьких температурах підкладки, отриманих Кохом та співробітниками [38], а також Ісікавою і Шубертом. Відзначено, що плівка p-типу з високою провідністю може бути виконана тільки у випадку великих частот збудження плазми (80 МГц). У той

же час, високопровідні плівки n-типу могли бути зроблені при використанні середньої частоти 13,56 МГц.

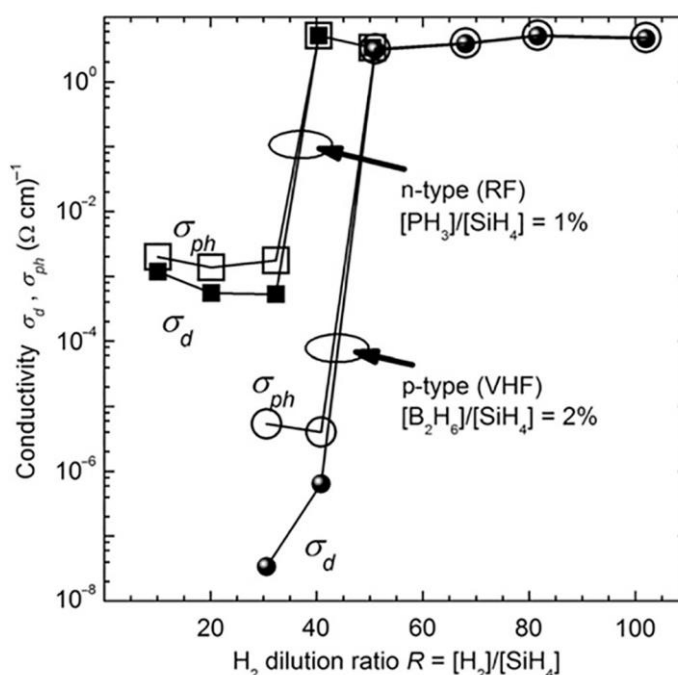


Рисунок 2.2 – Провідність (σ_d) та фотопровідність (σ_{ph}) плівок n-типу р-типу, виконаних при низьких температурах підкладки та при різних значеннях R [1]

2.3 Формування сонячних елементів на гнучких підкладках

Кох і його співробітники показали [38], що *pc-Si* як активний шар сонячного елемента р-і-п дає кращі параметри у випадку нанесення плівки при низьких температурах ($T_d = 100^\circ\text{C}$). При $T_d = 75^\circ\text{C}$ ефективність перетворення отриманого елемента становила 3,8%. При цьому ефективність перетворення 6% була отримана для $T_d = 100^\circ\text{C}$. Після фото-індукованої деградації ефективність перетворення дещо зменшилася і склала $\eta \approx 5\%$ для структур, що утворюються при $T_d = 110^\circ\text{C}$ [49].

На рис.2.3 показано співвідношення між довжиною фоточутливості та амбіполярною дифузією для активного шару, що формується з *pc-Si*, при

низькій температурі $T_d = 110^\circ\text{C}$ (рис.2.3,а) та ефективності перетворення контактів сонячного елемента, нанесеного на підкладку Asahi-U і використання цієї плівки (рис.2.3,б). Значення показані для ефективності елемента р-і-п до і після освітлення для 100 годин світла з інтенсивністю АМ 1,5.

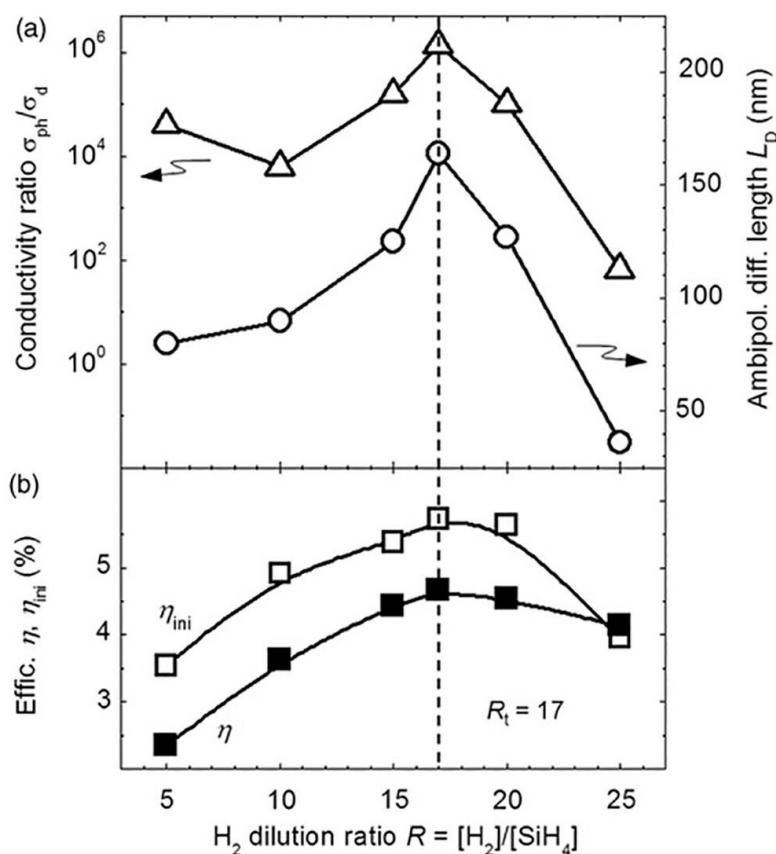


Рисунок 2.3 – Вплив R на фоточутливість і довжину амбіполярної дифузії носіїв заряду нелегованої гідрогенізованої кремнієвої плівки, виконаної при низькій температурі підкладки (а), і на ефективність перетворення сонячного елемента перед (η_{ini}) і після (η) розширене освітлення (б)

Можливість зміни ширини оптичної смуги при зміні R дозволяє формувати багатoelementні сонячні елементи при низьких температурах [43]. На рис.2.4 показані вольт-амперні характеристики для двоелементних (тандемних) і чотирьохелементних сонячних елементів, утворених на гнучкій фользі ПЕТ.

У [44] повідомили про створення "низькотемпературних" сонячних елементів $p-i-n/p-i-n$ і $n-i-p/n-i-p$ з початковою (до деградації світлом)

ефективністю перетворення 6%. Дослідження впливу послідовності утворених шарів на стійкість параметрів структури у [45] показано, що структура *n-i-p* з активним шаром *pc-Si* є більш стабільною при дії світла.

На рис.2.5 представлені вольт-амперні характеристики, отримані для структури *p-i-n*, сформованої на скляній підкладці та підкладці з фольги товщиною 50 мкм. Обидві сонячні елементи площею 9 мм² формувалися в однакових умовах. Як видно, ефективність перетворення оптимізованого "низькотемпературного" сонячного елемента, утвореного на фользі ПЕТ, практично ідентична ефективності перетворенню елемента, утвореного на склі.

У випадку сонячних елементів, інтегрованих в одяг, підкладки сонячних елементів повинні бути достатньо тонкими, щоб не змінювати істотно «гнучкість» матеріалу, на якому вони розміщені. На рис.2.6,а і рис.2.6,б показано масив сонячних елементів *pc-Si*, утворених на тонкій фользі ПЕТ товщиною 23 мкм. Оскільки товщина активного шару батареї становить 1 мкм, механічна міцність батареї визначається фольгою ПЕТ. Однак, як видно з малюнка, сонячна батарея має форму матеріалу, до якого вона прикріплена. Ефективність перетворення показаного сонячного елемента становить 5%. Відзначимо, що ми також створили тонкий і міцний матеріал для ізоляції сонячних елементів. На рис.2.6,в і рис.2.6,г показано приклади комерційних фотоелектричних модулів, які вбудовані в сорочки для подачі аварійних світлодіодів (рис.2.6,в), мобільного телефону, MP3-плеєра та інших електронних пристроїв, які використовують стандартний USB-роз'єм (рис.2.6,г). На рис.2.7 показані розрахункові ділянки, які необхідні для живлення цих електронних пристроїв, використовуючи в даний час різні тонкоплівкові сонячні елементи на гнучких підкладках. Автори відзначили, що, оскільки можна об'єднати сонячні батареї об'ємом 1000 см² у одяг для дорослих, гнучкі сонячні елементи можуть забезпечити необхідну потужність.

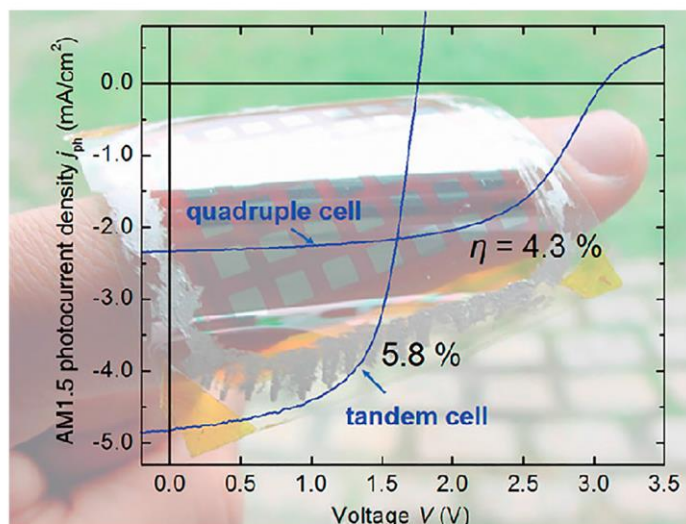


Рисунок 2.4 – Вольт-амперні характеристики двоелементної і чотирьохелементної сонячної батареї, утвореної на гнучкій фользі ПЕТ [1]

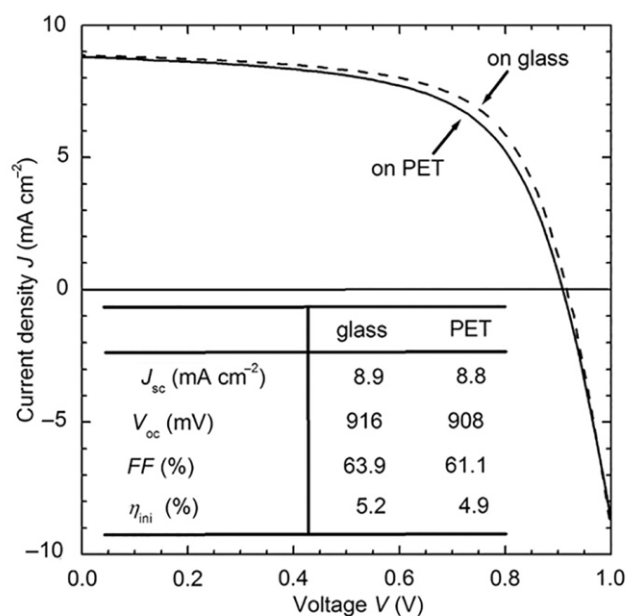


Рисунок 2.5 – Вольт-амперні характеристики «низькотемпературних» сонячних елементів $p-i-n$, утворених на склі та фользі ПЕТ

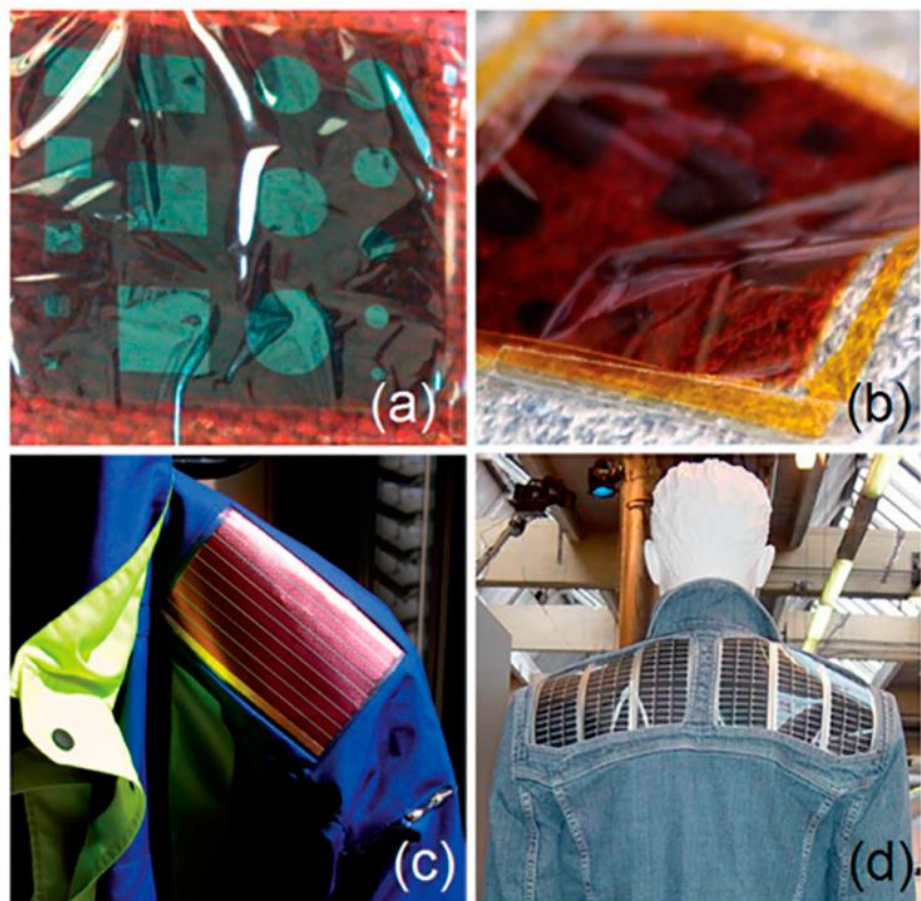


Рисунок 2.6 – Фото сонячних батарей на основі рс-Si, сформованого на 23 мкм фользі ПЕТ, дивлячись на зворотні контакти А (а), і вигляд спереду в напрямку падаючого світла (б), жакети з вбудованими в комерційну сонячну батарею на гнучких підкладках (в і г)

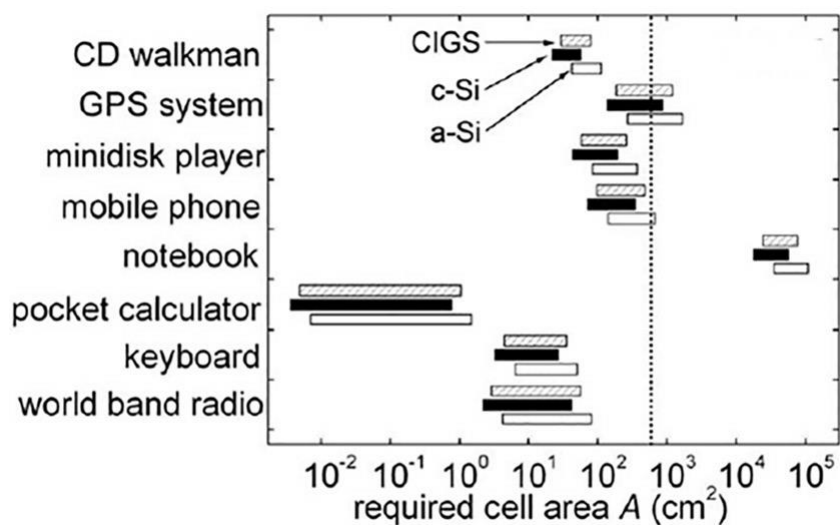


Рисунок 2.7 – Области "гнучких" тонкоплівкових сонячних батарей, інтегрованих в одяг, необхідних для живлення електронних пристроїв, зазначених на рисунку

2.2.1 Моделювання АМФС

Конкретно запропонована структура являє собою 4-термінальний тандем, як показано на рис.2.8. Товщина активних шарів, як очікується, буде близько 10 мкм. Нижній поліїмід може бути таким товстим, наскільки це необхідно для структурної підтримки, а верхній поліїмід (або інший) шар буде сконструйований так, щоб мінімізувати радіаційні пошкодження.

Найкращі елементи *CdSe* до теперішнього часу перебували в конфігурації МІН з *ZnSe* як ізоляційний (І) шар [46]. Для моделювання цієї структури було використано АМФС [47]. Типові значення для ключових параметрів були взяті з літератури, або за аналогією зі схожими матеріалами. Прикладом останньої є щільність станів (DOS) для зони провідності та зони валентності, які були обрані $1 \cdot 10^{18}$ та $1 \cdot 10^{19}$ відповідно. Концентрацію донорського легування $1 \cdot 10^{14}$ використовували для *CdSe*, тоді як $1 \cdot 10^{14}$ використовували для *ZnSe*, щоб зробити його ізолятором. Жодних дефектів в обох шарах не було. Діаграма рівноваги показана на рис.2.9. Як і очікувалося, шар *CdSe* повністю вичерпаний. Електронні спорідненості для *ZnSe* і *CdSe* становили 3,67 і 4,56 відповідно. Зсув зони провідності діє як гарне електронне дзеркало, тоді як зміщення валентної зони не перешкоджає потоку дірок.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

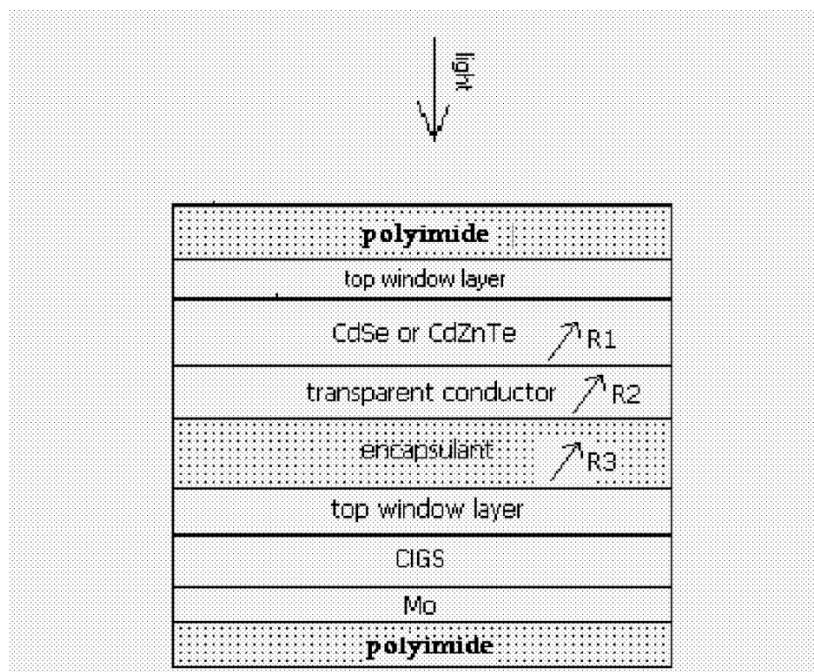


Рисунок 2.8 – 4-термінальна тандемна схема пристрою

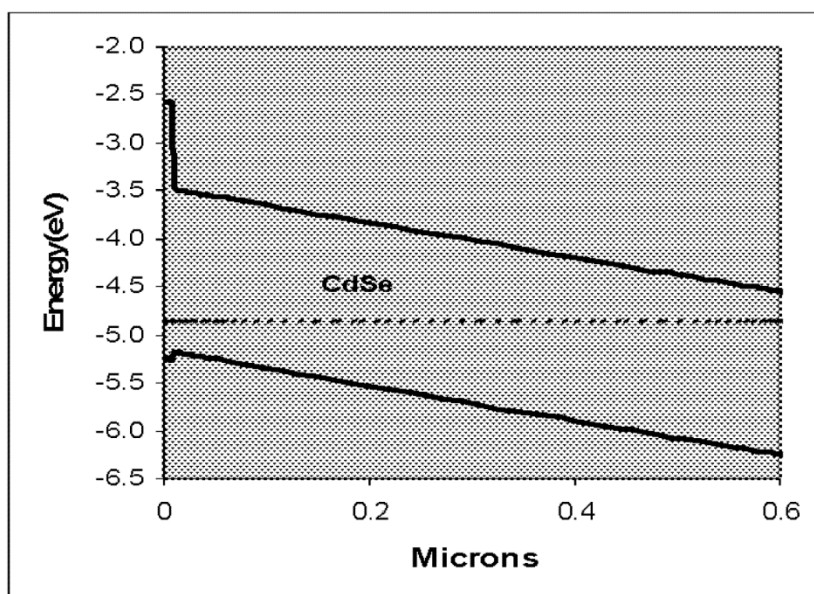


Рисунок 2.9 – Діаграма рівноважних зон для МДП структури $ZnSe/CdSe$

Крива освітлення IV показана на рис.2.10 і є майже ідеальною. Параметри V_{oc} : 1,11 вольт, J_{sc} : 19,3 mA/cm^2 (передбачається 5% втрат відбиття на фронті), FF: 0,81, η : 17,4%. Це дуже обнадіює, оскільки вказує на те, що структура МІН може задовольнити наші вимоги до продуктивності. Щоб змусити це працювати, потрібно знаходити зовнішні контакти з правильними енергіями. В

цьому випадку задній контакт перебував на 0,3 еВ від зони провідності $CdSe$, а передній контакт на 0,3 еВ від валентної зони $CdSe$. Таким чином, досягнутий V_{oc} – це, по суті, ширина забороненої зони $CdSe$ (1,7) мінус сума цих двох контактних напружень. Експериментально задній контакт не повинен створювати проблем, в той час як знайти передній контакт з такою високою енергією буде складно. Найвищі значення V_{oc} для цих пристроїв були дійсні для контактів Pt і Au (до 0,85 В, але з низькими J_{sc} і FF), які мають найвищі робочі функції. Також повідомлялося про залежність V_{oc} від роботи вихода.⁵ Обробка поверхні розділу з металом після нанесення була критичною для досягнення цієї мети; можливість отримання більш високої ефективності з цими структурами ще потрібно довести.

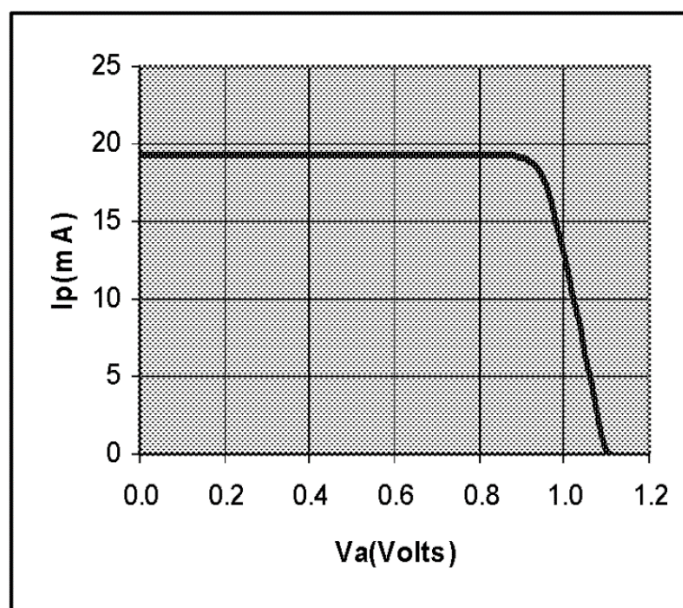


Рисунок 2.10 – Моделювання світла IV для структури MIN ZnSe/CdSe з ефективністю 17,4%

Для подальшого розуміння цих структур було змінено кілька параметрів. За допомогою електронних афінностей для $ZnSe$ і $CdSe$ 3,67 і 4,56 відповідно були зроблені наступні спостереження. Зміна товщини шару $ZnSe$ не впливає на продуктивність. Існує певна розбіжність у літературі щодо значень електронної близькості, тому доцільно змінювати цей параметр. Виявлено, що J_{sc} не

залежить від спорідненості $ZnSe$, тоді як залежність V_{oc} і FF показана на рис.2.11.

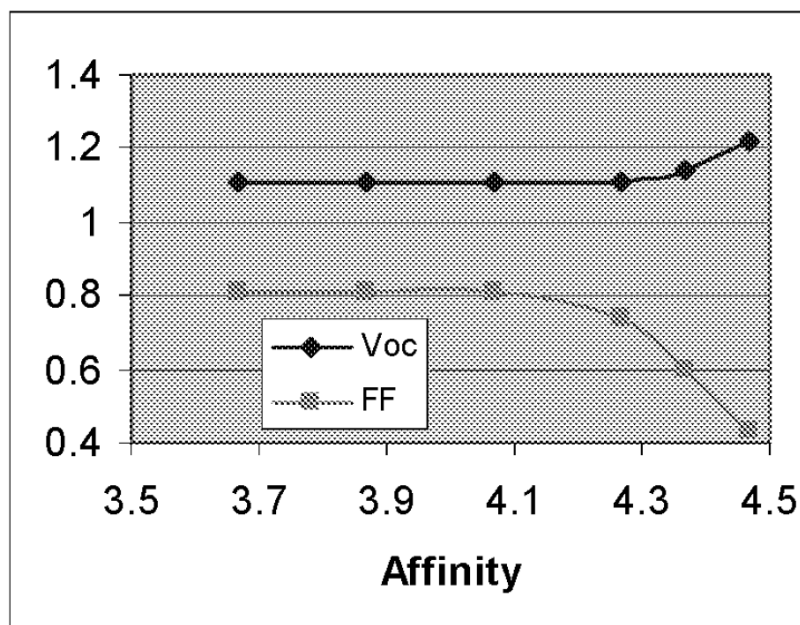


Рисунок 2.11 – Залежність V_{oc} і FF від спорідненості $ZnSe$

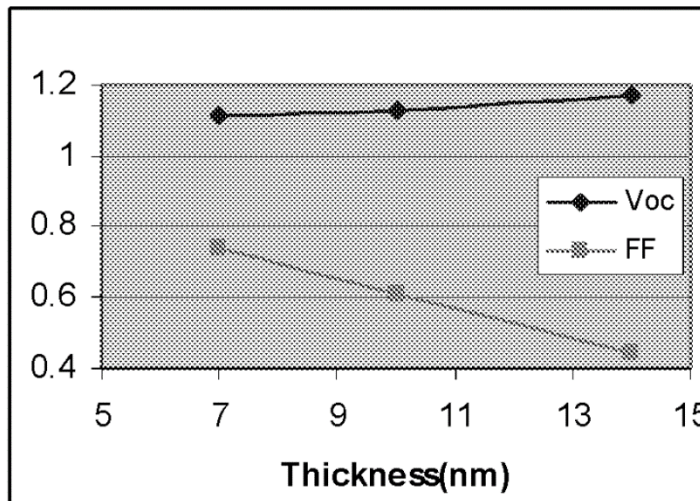


Рисунок 2.12 – Залежність V_{oc} і FF від товщини $ZnSe$ для спорідненості $ZnSe$ 4,27

При збільшенні афінності $ZnSe$ відбувається збільшення зсуву валентної зони, що призводить до поганого перенесення отворів через інтерфейс і зниження FF. Це призводить до невеликого збільшення V_{oc} . З спорідненістю

ZnSe в діапазоні переходів (4,27) (див. рис.2.12) в даний час існує сильна кореляція товщини *ZnSe* з FF і слабка залежність для V_{oc} . При афінності *ZnSe* 4,27 валентні та провідні смуги мають зміщення приблизно на 0,3 еВ; починається втручання в збір. Очевидно, що наявність правильної ширини забороненої зони і спорідненості до електронного шару є важливим. Примітно, що існує досить великий діапазон прийнятних значень.

Цікаво, що в жодному з вищенаведених моделювань не відбулося зниження J_{sc} . Щоб знайти межі, ми повертаємося до базового випадку і систематично збільшуємо заборонену зону I шару, зберігаючи при цьому все інше постійним. Тільки до того, як щільна зона I досягне 3,37 еВ, це впливає на J_{sc} . Світло і темно IV для цього випадку показано на рис.2.13. Як можна бачити, темний струм вперед сильно обмежений. J_{sc} трохи опустився до 18,6, але форма кривої різко впала. Будь-яке подальше збільшення забороненої зони призведе до подібних втрат в J_{sc} . Насичення темного струму до $1 \cdot 10^{-12}$ на рис.2.14 відбувається за рахунок великої забороненої зони *ZnSe*. На рис.2.14 показано вплив I шару зазорної щілини на темний струм.

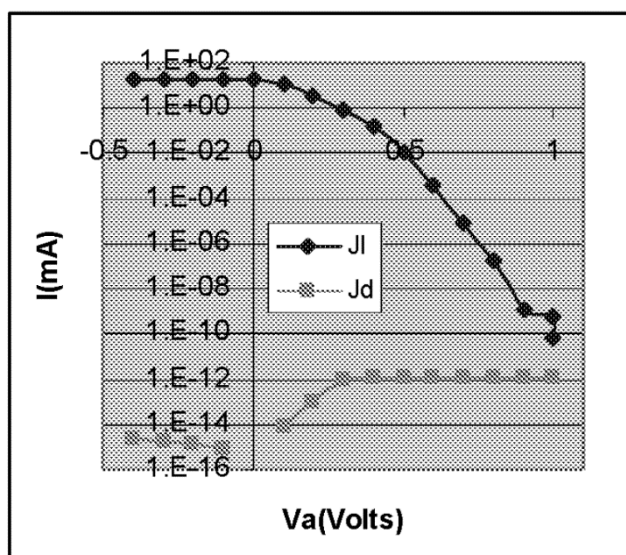


Рисунок 2.13 – ВАХ при освітлені і затемненні I шару для забороненої зони 3,37 еВ

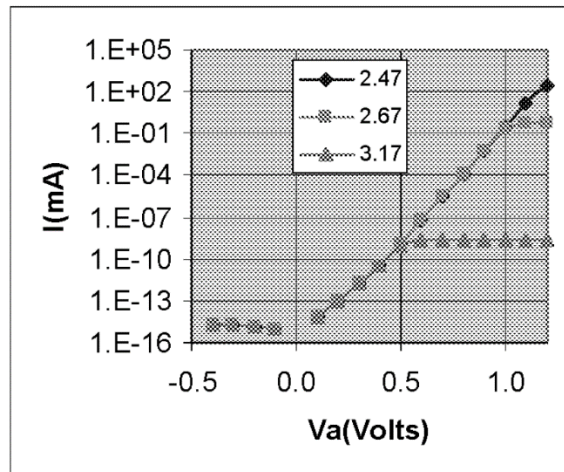


Рисунок 2.14 – Залежність насичення темного струму від енергетичного зазору I шару

Як видно, потік темного струму трохи більше одного вольт впливає на ширину забороненої зони $ZnSe$ 2,67 eV. Хоча це не впливає на J_{sc} , це впливає на FF (табл.1). Невелика втрата в FF для розриву смуги $ZnSe$ в межах 2,67 eV обумовлена самою смугою ширини, а не деталізацією вирівнювання смуги. Як видно на рис.2.12, потрібна велика зміна спорідненості для початку впливу на FF. Проте скромне збільшення забороненої зони призводить до більших втрат. Хоча нічого з цього не свідчить про те, що $ZnSe$ не є хорошим вибором, проте матеріал з меншою шириною забороненої зони буде дещо кращим. Це можна було б записати на рахунок відповідного дефекту інтерфейсу, що описаний для $ZnSe$. [48] У зв'язку з цим $ZnTe$ мав би перевагу забороненої зони над $ZnSe$ як I-шар, хоча є недолік через токсичність Te .

Таблиця 2.1. Властивості пристрою МІН як функції забороненої зони ізолятора.

E_g	J_{sc}	V_{oc}	FF	Eff. (η)
2.47	19.3	1.11	.89	19.0
2.67	19.3	1.11	.81	17.4
3.17	19.3	1.11	.37	7.9

Хоча залишаються невирішені питання по деталях для структури МІН, важливо, що при правильних умовах можна отримати задовільні результати.

Спочатку ми були стурбовані тим, що чутливість до сильної залежності товщини тунелювання для істинної структури МДП буде проблематичною, але ці пристрої не вимагають тунелювання для нормального функціонування. $ZnSe$ поводить себе не як шар І, а як тип гетеропереходного контакту з $CdSe$. До цього моменту ми ігнорували оптичні втрати через металевий контакт. З цієї причини метали не використовувалися в якості прозорих провідників в сонячних елементах. Як буде обговорюватися нижче, «М» в структурі МІН також може бути неправильним. Тобто метал, зокрема мідь, може реагувати з напівпровідниковими шарами. Це може бути його найбільш важливою роллю, і як тільки це буде досягнуто невеликою кількістю металу, верхня частина пристрою може бути оброблена стандартним прозорим провідником, таким як ZnO , з належними оптоелектронними властивостями.

Фактично це повертає нас до нашої концепції пристрою р-прозорого контакту, поглинача р-прозорого контакту. Дотримуючись того, що ми дізналися про структуру МІН, структура метал/ $ZnSe$ буде служити нашим р-прозорим контактом. Це повинно послужити хорошою відправною точкою для розробки наших пристроїв, зокрема поглиначів. В кінцевому рахунку нам доведеться замінити цей р-контакт на контакт з більшою ефективною енергією контакту, щоб досягти високого V_{oc} .

Технологія нижніх комірок $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ (СМІГ) вже існує. Наразі вона використовується на скляних підкладках, де ефективність понад 15% є звичайною. Деякі зусилля були спрямовані на розробку СМІГ на металевій фользі і Полііміді,[49] але продуктивність трохи нижче. Тим не менш, це може бути покращено з подальшими дослідженнями, і тому ми зосередимо наші зусилля в рамках цього проекту на верхній комірці. Саме тут необхідні інновації, оскільки не існує відомого тонкоплівкового пристрою з високою шириною забороненої зони і високою ефективністю. Нижче ми повідомляємо про прогрес у розвитку цієї верхньої комірки. На додаток до вимоги високої ефективності і легкої ваги існує додаткова вимога для структури тандемного

пристрою, а саме – він має бути прозорим для прийняття більш довгих хвиль. Наш підхід полягає в тому, щоб кожен технічну проблему розбити на окремі компоненти і вирішити по черзі.

Як показано на рис.2.16, виконання цього моделювання при нульовій атмосфері призводить до прогнозованої ефективності, що перевищує 20% – 13,8% вноситься верхньою коміркою з шириною забороненої зони 1,55 еВ, а 6,3% вноситься базовим елементом СМІГ. В цьому випадку ми стверджували, що верхньою коміркою може бути $Cd_{1-x}Zn_xTe$ (CZT) з невеликою кількістю цинку, який не повинен суттєво змінювати електронні властивості в порівнянні з властивостями $CdTe$, які використовувалися при моделюванні. Оскільки ширина забороненої зони верхньої комірки збільшується за межі 1,55 шляхом додавання більшої кількості Zn або використання $CdSe$ з шириною забороненої зони 1,7 еВ, очікувана ефективність зростає вище 20%. Таким чином, наша основна мета – продемонструвати верхню комірку з будь-якого з цих матеріалів з ефективністю у нульовій атмосфері 13% або більше.

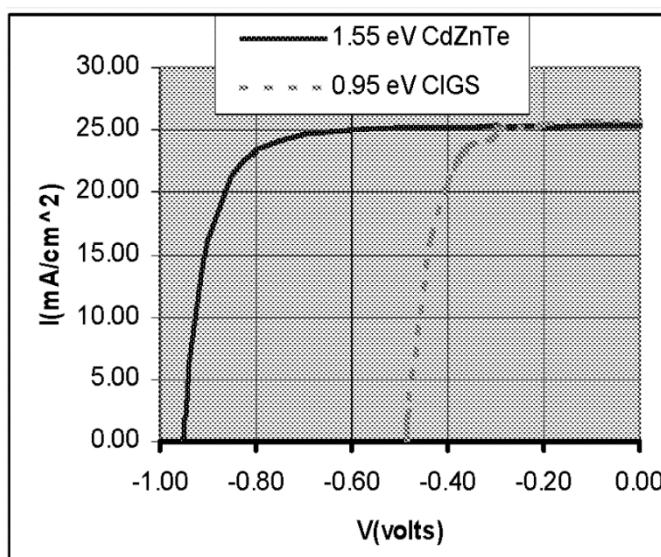


Рисунок 2.16 – Імітація кривих у нульовій атмосфері IV для тандемного пристрою, що складається з верхньої комірки 1,55 ЕВ і нижньої комірки СМІГ 0,95 еВ. Ефективність тандему становить 20,1%

2.2.2 Обробка матеріалів верхньої комірки

Ми використовуємо $CuIn_{1-x}Ga_xS_2$ (СМІГ2) (FSEC), $CdSe$ (USF) і CZT (USF) в якості можливих поглиначів для верхньої комірки. (СМІГ2) тонкі плівки готували сульфурізацією магнетронного розпилення прекурсора $CuGa/In$ постійного струму на підкладках з нержавіючої сталі. Зусилля по моделюванню і виготовлення в USF зосереджені на $CdSe$ і CZT в якості основних кандидатів. Прогрес, який ми обговоримо нижче, буде для $CdSe$. До сих пір велика частина зусиль на CZT була пов'язана з обробкою та характеристикою матеріалів.

2.2.3 Виготовлення $CdSe$

Щоб перевірити оптичні характеристики наших плівок $CdSe$, ми нанесли на скло плівку завтовшки 1600 нм і виміряли її профіль пропускання. Як видно на рис.2.17, $\sim 80\%$ передається в діапазоні довжин хвиль понад 750 нм, який є доменом базової комірки СМІГ. Це всього на 5% нижче, ніж 85%-ве значення, передбачуване в моделях для ефективності. Це дуже обнадіює, бо ця плівка є товстішою ніж плівка $CdSe$, яку ми очікуємо використовувати; не було зроблено ніяких спроб зменшити втрати на відбиття. Очікується, що велика частина втрат в 20% буде відображенням, яке буде зменшено при наявності верхніх шарів. Коли визначені відповідні рівні AR, очікується подальше зниження втрат.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

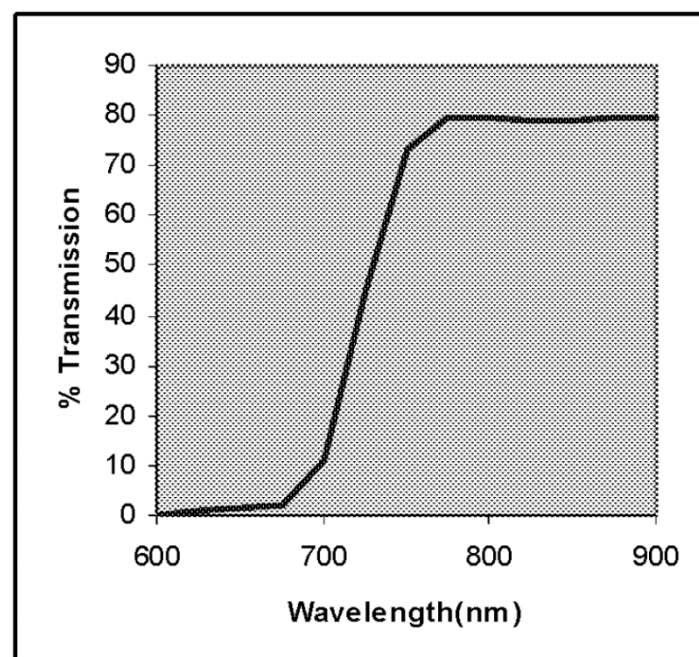


Рисунок 2.17 – Профіль пропускання плівки CdSe 1600 нм на склі

Наші первинні зусилля з виготовлення були зосереджені на структурі метал-ізолятор-напівпровідник (МІН). Як поверхні зростання ми використовували прозорий провідник. Структура пристрою – *Cu/ZnSe/CdSe/TC*. Температура підкладки *CdSe* варіювалася в діапазоні 450-600°C, в той час як температура підкладки для осадження *ZnSe* становила 200°C. Шари *ZnSe* і *Cu* наносяться послідовно методом ВН без розриву між ними. Однак вони осідають в системі, відмінною від *CdSe*, і, таким чином, поверхня *CdSe* піддається впливу навколишнього середовища до осадження контактних шарів МІ. *ZnSe* є суцільний шар, а метал осідає через тіньову маску.

Оскільки нашим головним завданням є демонстрація *CdSe* високого електронної якості, ми зосередили наші зусилля на демонстрації високих струмів короткого замикання в пристроях. J_{sc} зазвичай є індикатором об'ємних властивостей, в той час як V_{oc} і FF в тонкоплівкових пристроях часто більшою мірою залежать від властивостей інтерфейсу і властивостей контакту. Наприклад, ми очікуємо, що низький рівень V_{oc} в цих пристроях в першу чергу є результатом ефективної енергії контактів і має мало спільного з *CdSe*. Це більш імовірно, якщо ми побачимо хороші J_{sc} , що вказують на хороші

властивості для маси $CdSe$. Використовуючи J_{sc} в якості нашої заслуги, ми приступили до зміни параметрів осадження $CdSe$ для оптимізації його електронних властивостей, зокрема J_{sc} . На рис.2.18 ми показуємо спектральний відгук КЕ пристрою з найвищим значенням J_{sc} , якого ми досягли на сьогоднішній день. Калібрування КЕ досягається шляхом калібрування нашого джерела світла по еталонній комірці Si . J_{sc} визначається шляхом інтегрування зовнішнього спектра КЕ і становить $14,7 \text{ mA/cm}^2$. Це фактично виміряне значення J_{sc} пристрою.

Коли зовнішній спектр КЕ на рис.2.18 нормалізований щодо пропускання шару $Cu/ZnSe$, виходить внутрішній спектр КЕ. Інтеграція цього спектра призводить до еквівалентної внутрішньої генерируючої $J_{sc} = 18,3 \text{ mA/cm}^2$. Це знаходиться в межах 1 mA/cm^2 від J_{sc} для імітованого 17,4% МДП-пристрою в таблиці 1. Таким чином, цей результат є переконливим свідченням того, що ми зробили дуже гарне електронно якісне $CdSe$. Оскільки $CdSe$ знаходиться на прозорому провіднику, це становить великий крок вперед до досягнення наших спільних цілей. Наступним напрямком наших зусиль є розробка верхніх контактних шарів. Ось звідки прийде вища V_{oc} ; вищий V_{oc} збільшить внутрішні поля, які повинні додатково підлаштувати значення J_{sc} , а також FF.

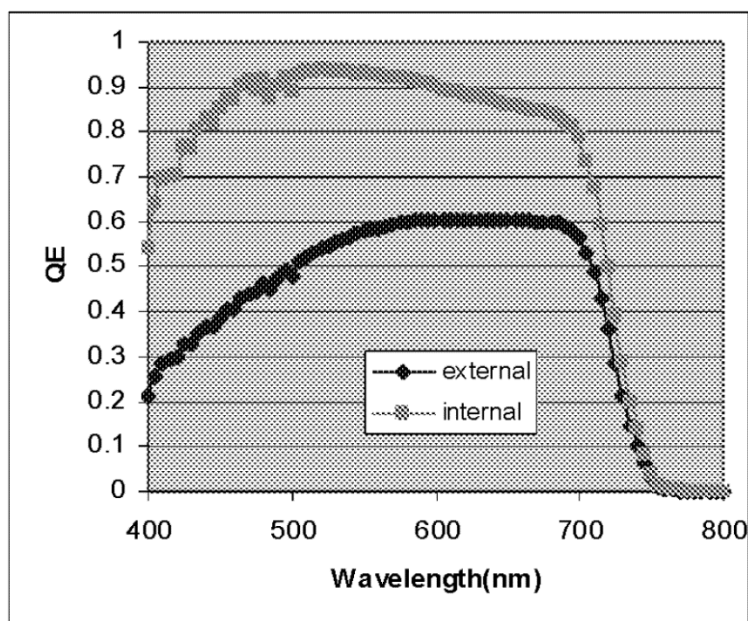


Рисунок 2.18 – Зовнішній та внутрішній КЕ пристрою $Cu/ZnSe/CdSe/TC$

2.2.4 ClGS2 Тонкі плівки на металевій фользі

Підкладки, використані в цьому дослідженні, включали фольгу з нержавіючої сталі (НС) товщиною 127 мкм і товщиною 20 мкм, а також титанову фольгу товщиною 25 мкм. Обговорювані тут результати відносяться до зразків на фользі з 127 мкм. Шари $CuGa$ і In попередника представляли собою магнетронне розпилення постійного струму, нанесене на покриття Mo плівки НС з співвідношенням елементів $Cu/(In+Ga) \sim 1,4$. Металеві попередники гомогенізували шляхом нагрівання зразків до $135^{\circ}C$ протягом 25 хвилин в потоці газу аргону. Тонкі плівки $CuInGa_xS_2$ (СМІГ2) готували сульфидуванням плівок-попередників $CuGa/In$ в газовій суміші $Ar: H_2S$ (4%) при $475^{\circ}C$. тонкі плівки $CuInGaS_2$ росли з фазою халькопирита $CuIn_{0.7}Ga_{0.3}S_2$ з $a = 5,67 \text{ \AA}$ і $c = 11,34 \text{ \AA}$ та кращою орієнтацією $\{112\}$.

Виділення фази Cu_xS на поверхні було витравлено 10% водним розчином KCN. Сонячні елементи СМІГ2 були укомплектовані осадженням гетеропереходів CdS хімічним осадженням в ванні, прозорим провідним бішаром $ZnO/ZnO: Al$ методом ВЧ-розпилення і вакуумним осадженням контактних пальців Ni/Al через металеву маску. Тонкі плівки СМІГ2 і сонячні елементи були охарактеризовані методами атомно-силової мікроскопії (МАСМ), скануючої електронної мікроскопії (СЕМ), дифракції рентгенівських променів (ДРП), C-V, I-V, мікрофотолюмінесценції (МФЛ) і методами КЕ.

Безконтактне АСМ-зображення показало, що незабарвлені плівки СМІГ2 складаються з компактно упакованих, добре огранених зерен з розмірами в діапазоні 1-3 мкм з шорсткістю 0,19 мкм (рис.2.19). СЕМ-зображення незабарвленого зразка також показало великі, добре ограновані зерна. Таким чином, стехіометрія з високим вмістом міді під час росту плівок СМІГ2 привела до поліпшення морфології.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

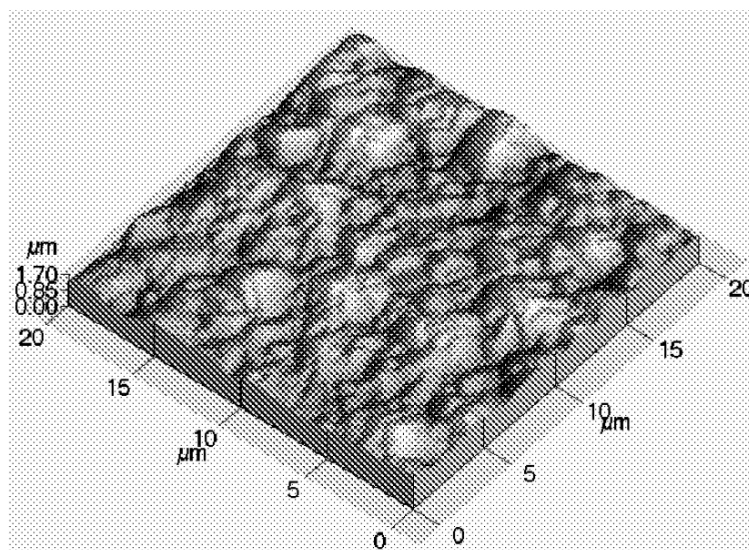


Рисунок 2.19 – Безконтактне АСМ-зображення незагравірованої плівки СМІГ2

СЕМ травлених плівок СМІГ2 має значно більш грубу поверхню з виступами і западинами. Аналіз ДРП і РСМА не вказує ознак структурних коливань. Тому неоднорідне розширення і зміна положення піку і амплітуди коливань сигналу мікро-PL можна пояснити грубою морфологією труєних плівок. Було виявлено, що щільність носіїв СМІГ2, витягнута з даних CV, варіюється в діапазоні середини 10^{16} см^{-3} і відносно постійна між 80 і 180 нм від з'єднання. Фотоелектричні параметри найкращого сонячного елемента СМІГ2 на гнучкій фользі НС, виміряні в НАСА ДЦГ в умовах нульової атмосфери, були $V_{oc} = 802,9 \text{ мВ}$, $J_{sc} = 25,07 \text{ мА/см}^2$, $FF = 60,06\%$ і $\eta = 8,84\%$. Квантові характеристики ефективності дали ширину забороненої зони 1,50 еВ і лише невелику втрату CdS .

2.3 Висновки до розділу

Використання гнучких підкладок (фольга з нержавіючої сталі або пластикова фольга) є дещо простішим і дешевшим процесом формування сонячного елемента, що частково пояснюється можливістю використання «рулонної» техніки. Виробництво сонячних елементів на основі

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

гідрогенізованих кремнієвих плівок на гнучких полімерних підкладках вимагає розробки технології сонячних батарей на основі цього матеріалу, приготованого при відносно низьких температурах ($T < 150^{\circ}\text{C}$). Кращим матеріалом для формування активного шару в цьому випадку є протокристалічний гідрований кремній *pc-Si*: H, параметри якого сильно залежать від співвідношення воднево-силанової газової суміші і конструкції реактора для осадження плівок. Наявні в даний час кремнієві сонячні батареї, виготовлені на неструктурованій ПЕТ-фолзі при температурі підкладки $T_d = 110^{\circ}\text{C}$, показують ефективність перетворення $\eta \approx 5\%$. [50] Гнучка сонячна батарея, площею 40 см^2 , що складається з 10 сонячних елементів, демонструє ефективність перетворення 3%. Дослідження показують, що є можливості для підвищення ефективності перетворення цих елементів, вони пов'язані з відповідною зміною структури шарів, що утворюють сонячний елемент, і структурою елемента.

Значний прогрес був досягнутий за допомогою *CdSe* з використанням структури МІН. Ми змоделювали цю структуру і продемонстрували, що вона може відповідати нашим цілям ефективності. Керуючись цими результатами, ми використали *металева/ZnSe/CdSe/TC* структуру як формат нашого пристрою для оцінки *CdSe*. Продемонстровано зовнішнє і внутрішнє J_{sc} 14,7 і 18,3 мА/см^2 відповідно. Важливість цього результату в тому, що він знаходиться на прозорому контакті і вказує на те, що ми можемо нанести *CdSe* високої електронної якості на прозорі провідники. Ми продемонстрували 80% пропускання світла для нижньої комірки через плівки *CdSe* 1600 нм. Це в межах досяжності нашої мети в 85% за рахунок використання покриття AR.

Нетравленні (СМІГ2) тонкі плівки, отримані сульфурізацією магнетронного розпилення прекурсора *CuGa/In* DC на підкладках з фольги з нержавіючої сталі, склалися з компактно упакованих, добре огранених зерен розміром від 1 до 3 $\mu\text{м}$ з шорсткістю 0,19 $\mu\text{м}$. Протравлені плівки СМІГ2 мали значно більш грубу поверхню з виступами і западинами. Найкраща

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ефективність сонячного елемента СМІГ2 на гнучкій фользі НС, виміряна в НАСА ДЦГ, склала 8,84% у нульовій атмосфері.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ГНУЧКИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Оптичні властивості гетеропереходу CdS/CdTe, отримані методом фізичного осадження з парової фази

Тонкоплівкові фотовольтаїчні сонячні елементи вважаються одними з перспективних сонячних елементів завдяки високій ефективності перетворення енергії, низькій вартості та зручності для широкомасштабного виробництва. Найбільш перспективними тонкоплівковими сонячними елементами є теллурид кадмію (*CdTe*), селенід галію індію міді (СМІГ) та аморфний кремній (α -*Si*) з ефективністю 18,3%, 20% та 12,3 відповідно [51]. Як правило, ефективність тонкоплівкових сонячних елементів нижча в порівнянні з кремнієвими (на основі вафлі) сонячними елементами, однак виробничі витрати також нижчі. Як повідомлялося, [52] технологія *CdTe* коштує приблизно на 30% менше, ніж технологія СМІГ і на 40% менше, ніж технологія α -*Si*.

Передбачається, що теоретична ефективність сонячних елементів *CdS/CdTe* зросте до 28–30% [53,54]. Проте реальна ефективність фотоелектричних сонячних елементів на основі гетеропереходу *n-CdS/p-CdTe* в шаруватій структурі становить 20,4% [55], а ефективність сонячних модулів площею $> 1 \text{ см}^2$ становить 16,5% [56, 57]. Основні фактори впливу на цю різницю обумовлені оптичними втратами, поверхневою рекомбінацією, рекомбінацією в області простору заряду та тильним контактним ефектом.

Найкращі тонкоплівкові елементи малих площ на основі *CdTe* показують ефективність перетворення більшу 15% [58]. Також були продемонстровані модулі великої площі з ефективністю апертури понад 10% [59]. First Solar (найбільший виробник *CdTe*) повідомив, що середні показники ефективності швидко збільшилися з 12,9% у 2012 році до 16,6% у 2016 році для модулів *CdTe*

(First Solar, 2017). Показник ефективності модуля на основі *CdTe* на даний момент становить 18,6%. Найкращі показники ефективності СМІГ до теперішнього часу становили 17,5% для модулів [60]. Існує також значне промислове виробництво, засноване на матеріалах *CdTe/CdS*, представлене в значній мірі американською корпорацією First Solar, яка є постачальником фотоелектричних модулів, що використовуються на сьогодні найбільшою сонячною електростанцією Agua Caliente у Арізоні [61]. Слід зазначити, що технологія тонких плівок на основі *CdTe* – це перша технологія, яка дозволила знизити виробничі витрати на сонячну енергію до 0,57 \$/Вт [62]. Незважаючи на 10% різницю в константах решітки *CdS* та *CdTe*, вони утворюють електрично відмінний гетероперехід, як показують його високі фактори заповнення, до $FF = 0,75$ у виконаних пристроях.

Тонкі плівки гнучких сонячних батарей з використанням напівпровідникових сполук *CdS/CdTe* на сьогодні активно досліджують і в галузі інтересів декількох дослідницьких центрів у світі. Це пов'язано з тим, що гнучкі фотоелектричні елементи мають рекордну потужність на одиницю ваги – більше 2 кВт/кг [63]. Такі характеристики досягаються завдяки конструкції гнучкої сонячної панелі, де скляна підкладка замінюється поліамідною плівкою. В останні роки також з'явилися повідомлення про перші спроби виготовлення цього типу конструкцій на гнучких підкладках, включаючи обидві конфігурації: «superstrate» [64-65] і «substrate» [66].

В даний час розроблено багато методів для виробництва тонких плівок *CdTe*. У даній роботі представлений метод термічного випаровування [67]. Показник заломлення з даних оптичного пропускання може бути визначений генеруванням навколо максимумів та мінімумів пропускання так званого "розмиття" інтерференційної картини. [68]. Отже, інтерференційна картина вільного спектру поглинання осаджених плівок може бути використана для розрахунку показника заломлення за допомогою методу Swanepoel [69].

Це прямий метод, запропонований Swanepoel [70], який базується на використанні екстремумів інтерференційної картини тільки трансмісійного спектру, використовується для виведення реальної та уявної частин комплексного показника, а також для товщини напівпровідникової плівки. Завдяки використанню матеріалів з більш високим коефіцієнтом оптичного поглинання можна зменшити товщину активних фотоелектричних шарів [71], що впливає не тільки на зниження виробничих витрат, але й можливе зменшення ваги фотоелектричних приладів в залежності від того, яка підкладка використовується.

Багато теоретичних робіт зосереджені на детальному дослідженні залежності ефективності тонкоплівкових сонячних елементів $CdS/CdTe$ від деяких властивостей [72-76]. Однак результатів комплексних експериментальних досліджень спектральних залежностей основних оптичних констант було мало. Тому наші дослідження мають велике значення для подальшого розвитку високоефективних пристроїв на основі гетеропереходів для електроніки та сонячної енергії.

3.2 Методологія експерименту

Спочатку тонкі плівки $CdTe$ осаджували на очищених скляних підкладках методом термічного випаровування. У використовуваній установці можна одержувати серії (5-15 плівок) в одному циклі для різних технологічних параметрів: різної товщини $d = (0,01 - 12)$ мкм при постійній температурі осадження $T_S = (300 - 570)$ К ; однакової товщини d з різними T_S ; різної температури випаровування T_E (600 – 1070) К з постійною товщиною d або температурою осадження T_S .

Тонкі плівки $CdTe$, для дослідження, були отримані з різною товщиною (різний час осадження τ) при постійних T_S та T_E (табл.3.1). Температура осадження T_S становила 470 К, температура випаровування попередньо

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

синтезованих сполук $CdTe$ становила $T_E = 870$ К. Товщини тонких плівок визначалися часом осадження $\tau = (60 - 180)$ сек.

Наступним кроком було осадження шару CdS на тонких плівках $CdTe$ методом термічного випаровування. Технологічні параметри наведені в табл.2.

Таблиця 3.1. Технологічні параметри тонких плівок $CdTe$ і $CdS/CdTe$.

Номер зразка	Температура підкладки T_s , К	Температура випаровування T_E , К	Час осадження τ , сек
CdTe/скло			
21	470	820	180
24	470	845	160
CdS/CdTe/скло			
21	470	1150	45
24	470	1150	30

Товщину зразків аналізували з використанням профілометра Bruker Dektak XT. Спектри оптичного пропускання досліджувались шляхом вимірювання трансмісії, T при нормальних умовах і кімнатній температурі. Вимірювання проводили в діапазоні довжин хвиль 190 – 3300 нм з кроком 1 нм за допомогою спектрометра UV-Vis-NIR з серії Cary Agilent Technologies.

3.3 Результати та аналіз даних

Оптична характеристика тонких плівок дає інформацію про інші фізичні властивості, такі як, ширина забороненої зони, зонна структура та оптично активні дефекти [77]. Вивчено вплив товщини та властивостей гетеропереходу на оптичне пропускання плівок $CdTe$ та $CdS/CdTe$. Область основного поглинання спостерігалася в спектрах пропускання. Спектри пропускання тонких плівок $CdTe$ та $CdS/CdTe$, отримані на скляних підкладках різної товщини, вимірювали в діапазоні довжин хвиль від 180 до 3300 нм і показані на рис.3.2. Можна помітити, що плівки дуже прозорі у ближній інфрачервоній області. Край поглинання становить близько 800 нм для всіх зразків, що цілком

відповідає ширині забороненої зони тонких плівок $CdTe$ [78]. Крім того, спостережувані інтерференційні картини у спектрах оптичного пропускання є показником однорідності товщини осаджених плівок [79].

На рис.3.2 можна побачити, що для вирощених плівок $CdTe$ значення трансмісії досягають до 90%, що також свідчить про високу прозорість плівок. Для товстої плівки $CdTe$ No21 (рис.3.1) спостерігається більш плавне зростання трансмісії з довжиною хвилі в порівнянні зі зразком $CdTe$ No24 (рис.3.2). Тут варто зазначити, що кількість "максимумів перешкод" також залежить від товщини плівки.

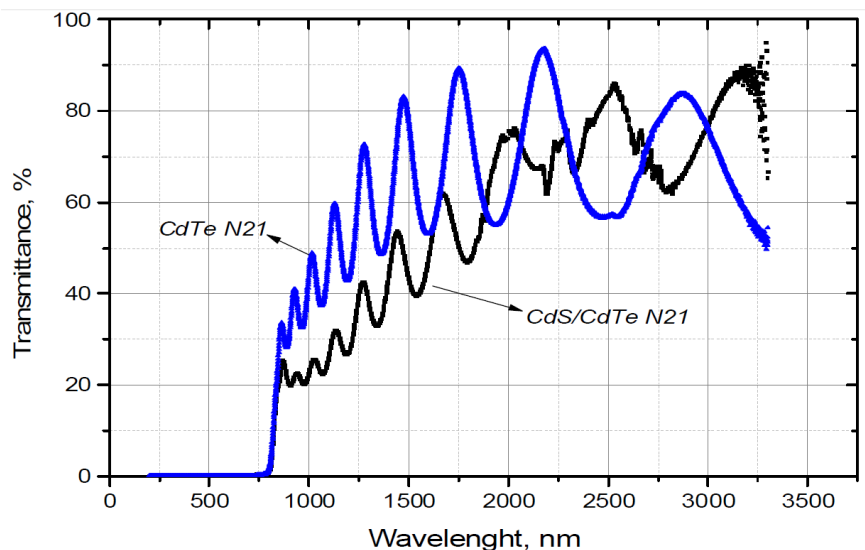


Рисунок 3.1 – Оптичний спектр пропускання тонких плівок $CdTe$ та гетероструктури $CdS/CdTe$ (зразок 21).

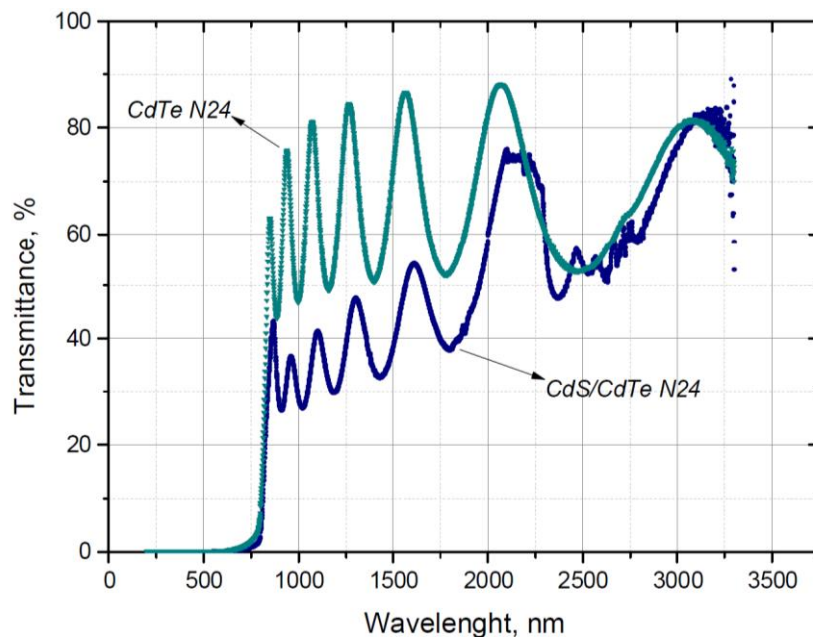


Рисунок 3.2 – Оптичний спектр пропускання тонких плівок *CdTe* та гетероструктури *CdS/CdTe* (зразок 24)

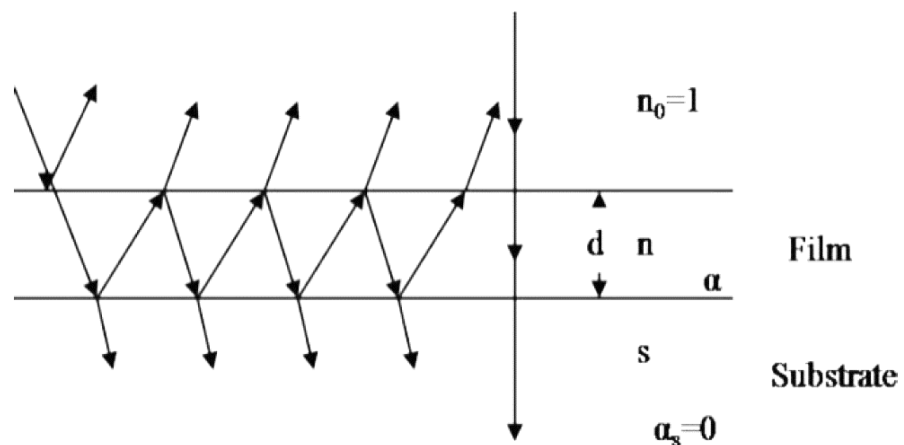


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення тонкої плівки на підкладці. Стрілки вказують на передачу та відображення на різних поверхнях поділу

Це можна пояснити тим, що існує різниця між показниками заломлення плівки та підкладки, а також через інтерференцію декількох світлових відбивань (рис.3.3) [80].

Значення трансмісії для гетеропереходу *CdS/CdTe* трохи нижче, ніж для чистих плівок *CdTe*, що може свідчити про більше відбивання або розсіювання в товщині плівки.

Одним з найпопулярніших методів, який використовує ці інтерференційні смуги для визначення оптичних властивостей матеріалу, є метод Swanepoel [81].

Тонка плівка на прозорій підкладці виглядає так, як на рис.3.3. На цьому малюнку n , α , d та T позначають показник заломлення, коефіцієнт поглинання, товщина та трансмісія плівки відповідно.

Прозора підкладка товщиною на кілька порядків більша з показником заломлення та коефіцієнтом поглинання $\alpha_s = 0$ і пропусканням T_s . Показник заломлення для повітря $n_0 = 1$. Якщо товщина d є рівномірною, то інтерференційні ефекти утворюють спектр. Інтерференційні смуги можуть бути використані для обчислення оптичних констант плівки, таких як показник заломлення, товщина плівки, коефіцієнт поглинання та оптична провідність.

Трансмісія T для нормального падіння, обумовлена інтерференцією хвилі, переданої з трьох інтерфейсів, може бути розрахована як [82]:

$$T = T(n, x) = Ax/(B - Cx\cos(\varphi) + Dx^2), \quad (3.1)$$

де

$$A = 16n^2s, \quad (3.2)$$

$$B = (n + 1)^3(n + s^2), \quad (3.3)$$

$$C = 2(n^2 - 1)(n^2 - s^2), \quad (3.4)$$

$$D = (n - 1)^3(n - s^2), \quad (3.5)$$

$$\varphi = 4\pi nd/\lambda, \quad (3.6)$$

$$x = e^{-\alpha d}. \quad (3.7)$$

Максимуми та мінімуми інтерференційних смуг визначаються з наступних рівнянь:

$$T_M = Ax/(B - Cx + Dx^2) \quad (3.8)$$

$$T_m = Ax/(B + Cx + Dx^2) \quad (3.9)$$

Індекс заломлення підкладки визначається з наступного виразу ($T_s = \max$):

$$s = 1/T_s^2 + (1/T_s^2 - 1)^{1/2} \quad (3.10)$$

З вище вказаних рівнянь визначається показник заломлення:

$$n = (N + (N^2 - s^2)^{1/2})^{1/2} \quad (3.11)$$

де

$$N = 2s(T_M - T_m)/T_M \cdot T_m + (s^2 + 1)/2 \quad (3.12)$$

Таблиця 3.2. Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для гетероструктури *CdS/CdTe*

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm ⁻¹	σ_{opt} , 10 ¹¹
2000	0,7562	0,5164	2,237				
1790	0,6739	0,4688	2,275				
1672	0,6184	0,4275	2,353	1729,00	3	2700,72	15,0
1543	0,5754	0,3953	2,425	1663,77	4	3069,41	17,5
1443	0,5359	0,3553	2,578	1318,88	4,5	4879,36	29,6
1339	0,4787	0,3286	2,583	1397,76	5	4053,22	24,6
1271	0,4252	0,2922	2,690	1514,54	5,5	5032,84	31,9
1188	0,3661	0,2666	2,644	1687,91	6	4306,65	26,8
1134	0,321	0,2386	2,695	1923,22	6,5	4872,13	30,9
1069	0,2902	0,224	2,643	2025,55	7,5	4553,93	28,3
1027	0,2572	0,2065	2,584		8		
976	0,2436	0,2003	2,520		8,5		
			<i>(d) 1657,58</i> <i>exp 1689 nm</i>				

Таблиця 3.3. Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для тонкої плівки *CdTe*

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm ⁻¹	σ_{opt} , 10 ¹¹
1	2	3	4	5	6	7	8
2498	0,9441	0,5529	2,382				
2181	0,9362	0,5474	2,391				
1935	0,914	0,5506	2,353	1403,159	3	64,44	2,85
1752	0,8929	0,5377	2,372	1442,819	4	511,03	2,53
1596	0,8624	0,5302	2,358	1414,053	4,5	455,21	6,75
1474	0,8305	0,5024	2,420	1437,777	5	1185,00	5,06

1363	0,7756	0,4869	2,397	1316,820	5,5	896,46	11,6
1277	0,726	0,4498	2,479	1467,810	6	1981,87	9,55
1192	0,66	0,4287	2,451	1481,673	6,5	1656,57	106
1129	0,5966	0,3158	3,043		7,5	1480,10	5,8
1064	0,541	0,3742	2,457	1473,072	8	1005,82	15
1016	0,4881	0,3383	2,539	1547,714	8,5	2523,31	18
965	0,4509	0,3252	2,490	1444,584	9,5	3076,79	22,6
928	0,4095	0,2977	2,548	1422,981	10,5	3766,45	19,7
889	0,3759	0,2835	2,500	1403,159	11,5	3346,23	
			(d) 1441,13 exp 1485 nm				

Таблиця 3.4. Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для гетероструктури *CdS/CdTe* (№24)

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm^{-1}	σ_{opt} , 10^{11}
1804	0,3662	0,2589	2,745				
1611	0,3907	0,2698	2,758				
1434	0,4132	0,2783	2,781	1196,811	3,5	5683,348	37,2
1304	0,4402	0,2983	2,699	1396,410	4	3771,711	24
1188	0,4758	0,3073	2,763	1293,906	4,5	4733,311	30,8
1102	0,5022	0,3264	2,692	1341,083	5	3214,134	20,4
1023	0,5409	0,3457	2,666	1781,445	6	2375,072	14,9
961	0,6244	0,3783	2,665	1516,782	6,5	2219,331	13,9
			(d) 1421,071 exp 1490 nm				

Таблиця 3.5. Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для тонкої плівки *CdTe* (№24)

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm ⁻¹	σ_{opt} , 10 ¹¹
2477	0,885	0,5265	2,402				
2066	0,8812	0,5172	2,432				
1782	0,8764	0,5191	2,419	1290,680	2,5	571,4192	3,25
1566	0,8664	0,5077	2,449	1293,241	3	1040,131	5,99
1397	0,8549	0,5069	2,436	1292,578	3,5	724,5566	4,15
1268	0,8444	0,4914	2,484	1265,469	4	1369,256	8
1159	0,826	0,4907	2,461	1319,135	4,5	808,1503	4,68
1073	0,8111	0,4724	2,516	1294,507	5,5	1637,885	9,7
998	0,7767	0,4691	2,478	1391,304	6	972,2801	5,67
939	0,7573	0,4466	2,550	1350,514	7	2085,314	12,5E
888	0,6826	0,4379	2,452	1792,857	8	947,8748	5,47
850	0,6309	0,4286	2,380		9		
			(d) 1421,071 exp 1490 nm				

Використовуючи рівняння (11) та (12) та з урахуванням $s = 0,92$, можна отримати показник заломлення зразків *CdTe* та *CdS/CdTe*. Розрахункові значення показника заломлення (n) представлені в таблицях II-V для тонких плівок *CdTe* та гетероструктури *CdS/CdTe*. Показник заломлення – це діапазон частот, в яких плівки слабо поглинають. На рис.3.4-3.5 показано зміну показника заломлення плівок *CdTe*, а середнє значення – приблизно 2,48 для зразка №21 і 2,45 для зразка №24. Ці значення цілком відповідають літературним, які мають відношення до тонких плівок *CdTe* до 2,5 [83]. Для гетероструктури *CdS/CdTe* ці значення приблизно 2,52 для зразка №21 і 2,72 для №24. Ці дані відповідають літературним [84].

Товщина плівки розраховується з рівняння:

$$d = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / 2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1) \quad (3.13)$$

за умови, що n_1 та n_2 є показниками заломлення хвиль λ_1 і λ_2 , розраховані для двох сусідніх максимумів або мінімумів. Для зразків *CdS/CdTe* No21 та *CdTe* No21 товщини плівок представлені у табл.3 та табл.4, відповідно, як d_1 . Порівнюючи експериментальні та розрахункові значення товщини, можна відзначити, що невелика різниця в значенні пов'язана з похибкою експериментальних досліджень.

Порядок інтерференції m на максимумах спектрів пропускання для довжини хвилі λ_1 становить:

$$m = \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (3.14)$$

де λ_1 та λ_2 – довжини хвилі двох сусідніх максимумів пропускання ($\lambda_1 > \lambda_2$).

Для області, де відбувається сильне поглинання світла, показник заломлення визначається наступним чином:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(n-1)^3(n-s^2)}{E_m - (E_m^2 - (n^2-1)^3(n^2-s^4))^{0.5}} \quad (3.15)$$

де

$$E_m = \left(\frac{8n^2s}{T_m} \right) - (n^2 - 1)(n^2 - s^2) \quad (3.16)$$

Для гетеропереходу *CdS/CdTe* відбувається значне збільшення коефіцієнта поглинання світла в кілька разів, перш за все, в короткохвильовій області спектра (рис.3.7). Це пов'язано з тим, що тонкий шар *CdS*, завдяки великій забороненій зоні (2,42 еВ), відіграє роль «вікна поглинання» для поглинання світла.

Фотони, поглинені в шарі «вікон», не сприяють фотоструму, оскільки дуже ймовірно, що відбувається рекомбінація, що приводить до розсіювання світла. Тому поглинання в шарі *CdS* є джерелом значних втрат.

Для зразків 21 та 24 значна різниця коефіцієнтів поглинання спостерігається для відповідних довжин хвиль. Можна відзначити, що

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнт поглинання для тонких плівок CdTe набуває більших значень, ніж для гетеропереходу CdS/CdTe на відповідних довжинах хвиль для обох зразків.

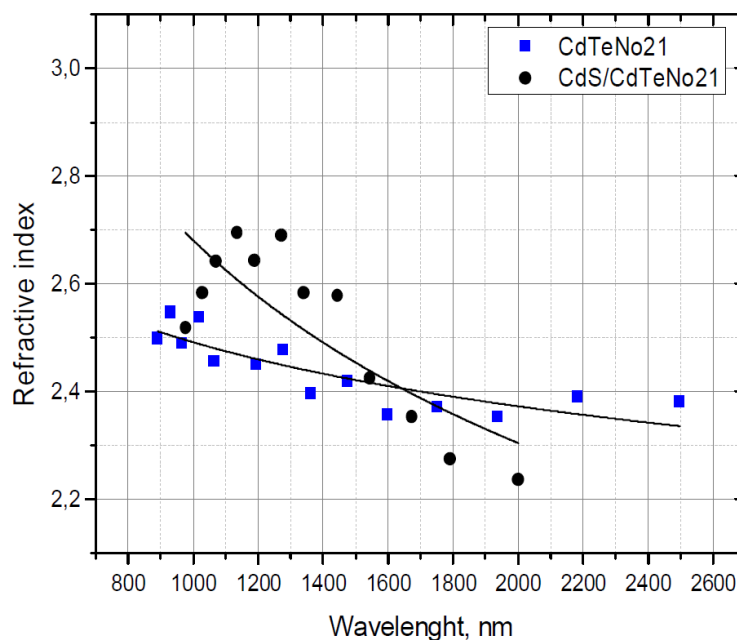


Рисунок 3.4 – Залежність показника заломлення від довжини хвилі тонкої плівки CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (№21).

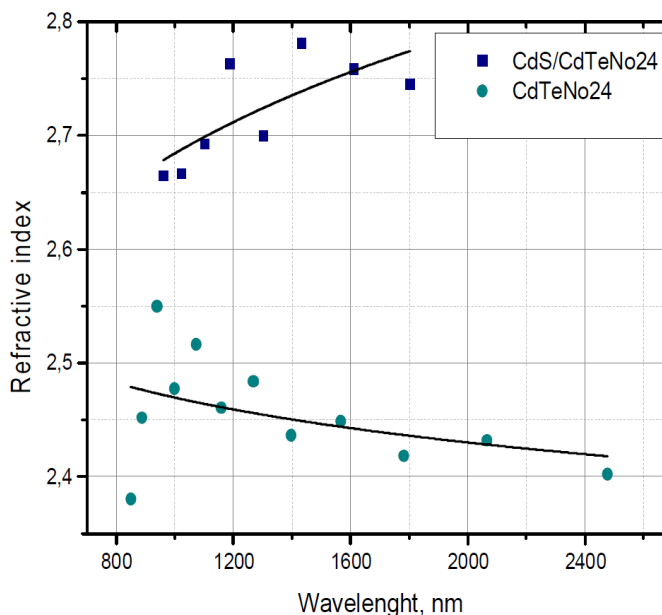


Рисунок 3.5 – Залежність показника заломлення від довжини хвилі тонкої плівки CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (№24).

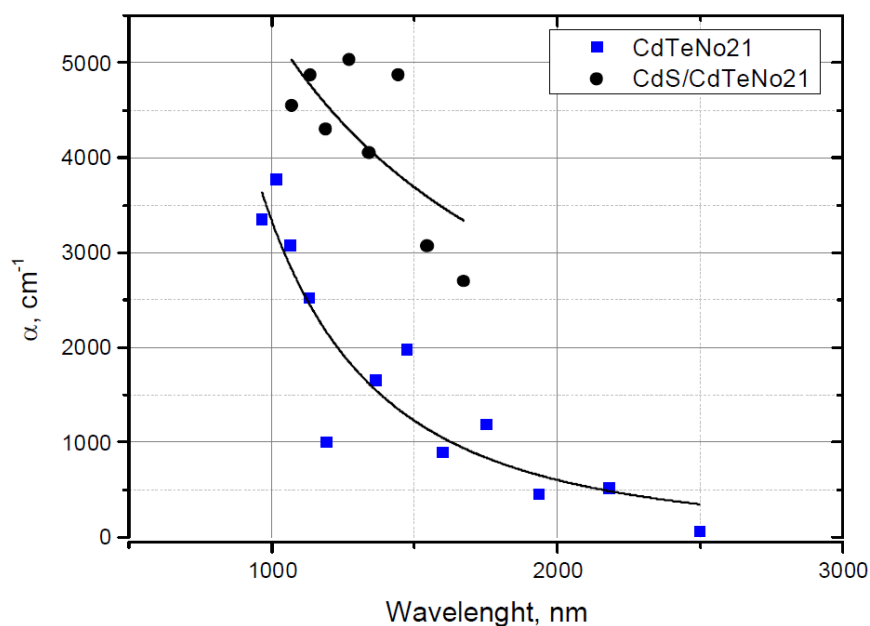


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для тонкої плівки *CdTe* та гетероструктури *CdS/CdTe* (№21).

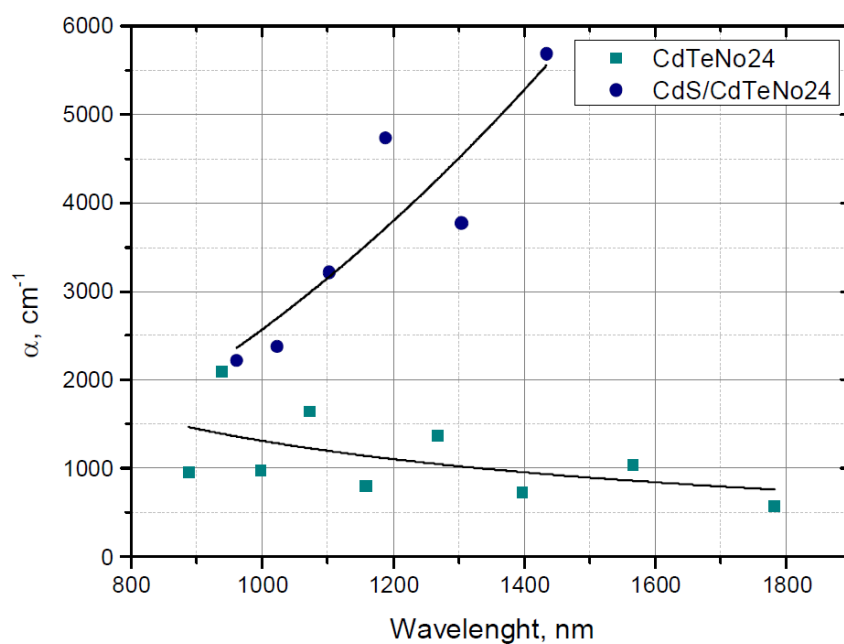


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для тонкої плівки *CdTe* та гетероструктури *CdS/CdTe* (№24).

3.4 Висновки до розділу

1. Гетероструктури $CdS/CdTe$ на скляних підкладках осаджено методом випаровування у вакуумі за різних технологічних факторів, зокрема різної товщини.
2. Проведено аналіз оптичних властивостей тонких плівок $CdTe$ а також досліджено їх зміну після додавання «абсорбційного вікна» CdS .
3. Встановлено, що тонких шар CdS істотно підвищує абсорбційні властивості плівки.
4. Теоретично обраховано товщину плівки і отримані результати збігаються із експериментальними дослідженнями профілометра.
5. Показано, що гетероструктури $CdS/CdTe$ завдяки високій поглинальній здатності мають перспективу використання як фотоелектричні перетворювачі світла.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд існуючих сонячних батарей, що містять сонячні елементи, які пройшли три покоління розвитку. З'ясовано, що поліпшення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну пов'язано з фізичними властивостями, технічними та економічними витратами.

2. Досліджені гетеросистеми ITO/CdTe отримані на гнучкій поліімідній підкладці методом магнетронного розпилення на постійному струмі. Визначено оптимальні фізико-технологічні режими отримання базових шарів телуриду кадмію стабільної кубічної модифікації на поліімідній плівці. Досліджені фотоелектричні властивості гнучких сонячних елементів поліімід/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au тильної конфігурації, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі. Показано, що охолодження гетеросистеми ITO/CdS перед нанесенням шару CdTe, винос на повітря та послідовний нагрів у вакуумі до необхідної температури підкладки призводять до зростання значень коефіцієнту корисної дії та напруги холостого ходу сонячного елементу

3. Встановлено товщину шару сульфідів і хлоридів кадмію, при яких спостерігається максимальне значення ефективності СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au отриманих методом термічного вакуумного осадження. Оптимальна товщина шару сульфідів кадмію в конструкції СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au сформованому на поліамідних підкладках більша, ніж при використанні скляних підкладок, а товщина шару хлоридів кадмію – менша.

4. Досліджено характеристики і питома потужність тонкоплівкових сонячних елементів (СЕ) на гетероструктурах ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, які сформовані на скляних підкладках, поліамідних плівках та фользі. Проведено аналіз оптичних властивостей тонких плівок CdTe. Виявлено декілька підходів для поліпшення загальної ефективності пристрою та співвідношення потужності/ваги гнучких сонячних елементів.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

5. Розглянуто нетравленні (СМІГ2) тонкі плівки, отримані сульфурізацією магнетронного розпилення прекурсора *CuGa/In* DC на підкладках з фольги з нержавіючої сталі. Вони склалися з компактно упакованих, добре огранених зерен розміром від 1 до 3 мкм з шорсткістю 0,19 мкм. Протравлені плівки СМІГ2 мали значно більш грубу поверхню з виступами і западинами. Значний прогрес був досягнутий за допомогою *CdSe* з використанням структури МІН. Було змодельовано структуру і продемонстровано, що вона може відповідати нашим цілям ефективності. Керуючись цими результатами, ми використали *металева/ZnSe/CdSe/TC* структуру як формат нашого пристрою для оцінки *CdSe*. Продemonстровано зовнішнє і внутрішнє J_{sc} 14,7 і 18,3 мА/см² відповідно. Важливість цього результату в тому, що він знаходиться на прозорому контакті і вказує на те, що ми можемо нанести *CdSe* високої електронної якості на прозорі провідники. Ми продемонстрували 80% пропускання світла для нижньої комірки через плівки *CdSe* 1600 нм.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tanner D, Mei F, Le M, Su J, Luu C, Lu W, Frei M, Prabhu G, Chae YK, Eberspacher C. Fabrication and performance of large area thin film solar modules. Proc. of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. D. Lincot, H. Ossenbrink and P. Helm eds., WIP-Renewable Energies, Munich, 2008, p. 2489-2491.
2. Tanda M, Tabuchi K, Uno M, Kato S, Takeda Y, Iwasaki S, Yokoyama Y, Wada T, Shimosawa M, Sakakibara Y, Takano A, Nishihara H, Enomoto H, Kamoshita T. Large-area, light-weight, flexible solar cell production technology — ready for market entry. Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, New York, 2005, p. 1560-1563.
3. Schubert MB, Ishikawa Y, Kramer JW, Gemmer CEM, Werner JH. Clothing Integrated photovoltaics. Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, New York, 2005, p. 1488-1451.
4. Yano M, Suzuki K, Nakatani K, Okaniwa H. Roll-to-roll preparation of a hydrogenated amorphous silicon solar cell on a polymer film substrate. Thin Solid Films, 1987, 146:75- 81.
5. Haug F-J, Soderstrom T, Python M, Terrazzoni-Daudrix V, Niquille X, Ballif C. Development of micromorph tandem solar cells on flexible low-cost plastic substrates. Sol. Energ. Mater. Sol. Cell., 2009, 93:884-887.
6. Kessler F, Herrman D, Powalla M. Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells. Thin Solid Films, 2005, 480-481:491-498.
7. Brabec CJ. Organic photovoltaics: technology and market. Sol. Energ. Mater. Sol. Cell., 2004, 83:273-292.
8. Merz R. Method for producing series-connected solar cells and apparatus for carrying out the method. US patent application 2009/0017193 (2009).
9. Ishikawa Y, Schubert MB. Flexible protocrystalline silicon solar cells with amorphous buffer layer. Jpn. J. Appl. Phys., 2006, 45:6812-6822.

10. Mathew, X., Gerald, W.T., Singh, V.P., McClure, J.C., Velumani, S., Mathews, N.R., Sebastian, P.J., 2003. Development of CdTe thin films on flexible substrates—a review. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 76, 293–303.
11. Bube Richard, H., 1988. CdTe junction phenomena. *Solar Cells* 23, 1–17. Chu, T.L., 1988. Thin film cadmium telluride solar cells by two chemical vapour deposition techniques. *Solar Cells* 23, 31–48.
12. Mitchell, K.W., Eberspacher, C., Cohen, F., Avery, J., Duran, W., Bottenberg, W., 1988. Progress towards high efficiency thin film CdTe solar cells. *Solar Cells* 23, 49–57.
13. Kroger, F.A., Rod, R.L., Panicker M.P.R., 1983, US patent 4400244, August (1983).
14. Panicker, M.P.R., Knaster, M., Kroger, F.A., 1978. Cathodic deposition of CdTe from aqueous electrolytes (large area solar cells). *J. Electrochem. Soc.* 125, 556–572.
15. Basol, B.M., 1988. Electrodeposited CdTe and HgCdTe solar cells. *Solar Cells* 23, 69–88.
16. Basol, B.M., 1984. High-efficiency electroplated heterojunction solar cell. *J. Appl. Phys.* 55, 601–603.
17. German, P.H., Mathew, X., Pantoja Enriquez, J., Mathew, P.J., Sebastian, P.J., 2001. Influence of the deposition potential on the structure and composition of the CdTe films electrodeposited on stainless steel substrates. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 70, 269–275.
18. Paulson, P.D., Mathew, X., 2004. Spectroscopic ellipsometry investigation of optical and interface properties of CdTe films deposited on metal foils. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 82, 279–290.
19. Vijay, P.S., John, C.M, Lush, G.B., Wang, W., Wang, X., Thompson, G.W., Clark, E., 1999. Thin film CdTe–CdS heterojunction solar cells on lightweight metal substrates. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 59, 145– 161.

20. Matulionis, I., Sijin, H., Drayton, J.A., Price, K.J., Compaan, A.D., 2001. Cadmium telluride solar cells on molybdenum substrates. In: Proceedings of the Materials Research Society symposium on II–VI compound semiconductor photovoltaic materials, Warrendale, PA, USA, Vol. 668 H8.23.1-6.
21. McCandless, B.E., Youm, I., Birkmire, R.W., 1999. Optimization of vapor post-deposition processing for evaporated CdS/CdTe solar cells. Prog. Photovolt. Res. Appl. 7, 21–30.
22. Tiwari, A.N., Romeo, A., Baetzner, D., Zogg, H., 2001. Flexible CdTe solar cells on polymer films. Prog. Photovolt. Res. Appl. 9, 211–215.
23. Romeo, A., Khrypunov, G., Kurdesau, F., Baetzner, D.L., Zogg, H., Tiwari, A.N., 2004. High efficiency flexible CdTe solar cells on polymer substrates. In: Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand, pp. 715–716.
24. Romeo, A., Arnold, M., Baetzner, D.L., Zogg, H., Tiwari, A., 2002. Development of high efficiency flexible CdTe solar cells. In: Proceedings of PV in Europe from PV Technology to Energy Solutions Conference and Exhibition, Rome, Italy, pp. 377–381.
25. Bonnet D., Meyers P. Cadmium telluride-materials for thin film solar cells // J. Mater. Res.– 1999.– Vol. 13, №10. – P. 2740 - 2753.
26. Batrner D., Romeo A., Dobeli M., Weinert K., Zogg H., Tiwari A.N. High energy irradiation pro-perties of CdTe/CdS solar cells//Proceedings of 29th EEE Photovoltaic Specialists Conference. New Orleans.– 2002.– P. 982 - 985.
27. Wu X., Keame J.C., Dhere R.G. at all. 16,5% - Efficient CdS/cdTe polycrystalline thin-film solar cells//Proceeding 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich. – 2002. – P. 995 - 999.
28. Romeo A. , Tiwari A.N. , Batzner D.L., Zogg H. Recrystallization in CdTe/CdS// Proceeding of 1999 European Material Conference. Strasbourg. – 2000.–P. 420 - 425.

29. Rauschenbach H.S. Solar Cell Array Design "The principles and Technology of photovoltaic Energy Conversion". New York: "Litton Educational Publishing", 1980. – 350 p.
30. Romeo A., Batzner D.L., Zogg H., Tiwari A.N. A comparison of the vacuum evaporated CdTe substrate and superstrate solar cells// Pros. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow.– 2000.–P. 843 - 846.
31. S.G. Bailey and D.J. Flood, "Space Photovoltaics," Prog. Photovolt. Res. Appl. Vol. 6, pp. 1-14 (1998).
32. P.A. lies, "Evolution of Space Solar Cells," Solar Energy Materials and Solar Ceils Vol. 68, pp. 1-13 (2001).
33. D.J. Hoffman, T.W. Kerslake, A.F. Hepp, M.K. Jacobs, and D. Ponnusamy, "Thin-Film Photovoltaic Solar Array Parametric Assessment," Proceedings 35 th IECEC, AIAA, Washington, D.C., Vol. 1, pp. 670-680, AIAA-00-2919 (2000).
34. H.W. Schock, and R. Noufl, "CIGS-based Solar Cells for the Next Millennium," Prog. Photovolt. Res. Appl., Vol. 8, pp. 151-160 (2000).
35. Houben L, Luysberg M, Hapke P, Carius R, Finger F, Wagner H. Structural properties of microcrystalline silicon in the transition from highly crystalline to amorphous growth. Phil. Mag., 1998, A77:1447-1452.
36. Losurdo M, Giangregorio M, Grimaldi A, Capezzuto P, Bruno G. A study of growth mechanism of microcrystalline thin silicon films deposited at low temperature by SiF4- H2-He PECVD. Eur. Phys. J.Appl. Phys., 2004, 26:187-192.
37. Schropp REI, Rath JK, Li H. Growth mechanism of nanocrystalline silicon at the phase transition and its application in thin film solar cells. J. Cryst. Growth, 2009, 311:760-764.
38. Koch C, Ito M, Schubert MB, Werner JH. Low-temperature deposition of amorphous silicon based solar cells. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1999, 557:749-754.

39. Ito M, Koch C, Svrcek V, Schubert MB, Werner JH. Silicon thin film solar cells deposited under 80°C. Thin Solid Films, 2001, 383:129-131.
40. Spear WE, LeComber PG. Substitutional doping of amorphous silicon. Solid State Comm., 1975, 17:1193-1196.
41. Alpuim P, Chu V, Conde JP. Amorphous and microcrystalline silicon films grown at low temperatures by radio-frequency and hot-wire chemical vapor deposition. J. Appl. Phys., 1999, 86:3812-3821.
42. Alpuim P, Chu V, Conde JP. Electronic and structural properties of doped amorphous and nanocrystalline silicon deposited at low substrate temperatures by radio-frequency plasma-enhanced chemical vapor deposition. J. Vac. Sci. Tech., 2003, A21:1048-1054.
43. Koh J, Ferlauto AS, Rovira PI, Wronski CR, Collins RW. Evolutionary phase diagrams for plasma-enhanced chemical vapor deposition of silicon thin films from hydrogen-diluted silane. Appl. Phys. Lett., 1999, 75:2286-2288.
44. Koch C, Ito M, Schubert MB. Low-temperature deposition of amorphous silicon solar cells. Sol. Energ. Mater. Sol. Cell., 2001, 68:227-236.
45. Ishikawa Y, Schubert MB. Protocrystalline silicon cells deposited at 110°C in nip and pin sequence. Proc. of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference. W. Palz, H. Ossenbrink and P. Helm eds., WIP-Renewable Energies, Munich, 2005, p. 1525- 1528.
46. H. Richter, "Development of p,n Heterojunctions Based on Thin Polycrystalline CdSe Films," Proceedings of the 20 th IEEE PV Specialist Conference, IEEE, New York, NY, Vol. 2, pp. 1537-1541 (1988).
47. S.J. Fonash, www.psu.edu/dept/AMPS/, (2000).
48. D. Bonnet and E. Rickus, "The CdSe Thin-Film Solar Cell," Proceedings of the 14 th IEEE PV Specialist Conference, IEEE, New York, NY, pp. 629-632 (1980).
49. D. Rudmann, F.-J. Haug, M. Krejci, H. Zogg and A. Tiwari, "Development of Flexible Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells on Polymers with Lift-off Processes,"th

Proceedings of the 16 European PVSEC, James and James (Science Publishers) Ltd., London, UK, Vol. 1, pp. 298-301(2000).

50. Schubert MB, Merz R. Flexible solar cells and modules. Phil. Mag., 2009, 89:2623-2644.
51. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 41), Prog. Photovolt. Res. Appl. 21 (2013) 1.
52. R. Swami, Solar cell, Int. J. Sci. Res. Publ. 2 (2012) 1.
53. L. Kosyachenko, T. Toyama, Current–voltage characteristics and quantum efficiency spectra of efficient thinfilm CdS/CdTe solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 120 (2014) 512.
54. L. Zhi, F. Lianghuan, Z. Guanggen, L. Wei, Z. Jingquan, W. Lili, W. Wenwu, Influence of CuxS back contact on CdTe thin film solar cells, J. Semicond. 34 (2013) 014008.
55. H. Kim, K. Cha, V.M. Fthenakis, P. Sinha, T. Hur, Sol. Energy 103, 78 (2014).
56. L. Kranz, S. Buecheler, A.N. Tiwari, Sol. Energ. Mat. Sol. C. 119, 278 (2013).
57. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, Progr. Photovolt.: Res. Appl. 21, 827 (2013).
58. Britt and Ferekides, 1993; Ohyama et al., 1997
59. Ullal et al., 2000.
60. Green et al., 2017.
61. <http://www.firstsolar.com/>, dost. z dn. 17/06/2013.
62. S. Girish Kumar, K.S.R. Koteswara Rao, Energ. Environ. Sci. 7, 45 (2014).
63. A.Romeo, M. Arnold, D.L. Batzner, H. Zogg, A.N. Tiwari, Proc. Conf. “ PV in Europe from PV Technology to Energy Solutions”. Rome, 377 (2002).
64. V.Valdna , J. Hiie, Pros. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich, 1233 (2001).
65. J. Perrenoud, S. Buecheler, A. N. Tiwari, „Flexible CdTe solar cells with high photovoltaic conversion efficiency”, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC, Philadelphia, PA, USA, 695-699, (2009).

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

66. W. L. Rance, J. M. Burst, M. O. Reese, D. M. Meysing, C. A. Wolden, T. A. Gessert, S. Garner, X. Li, P.Cimo, C. Kosik-Williams, T. M. Barne, „Flexible CdTe superstrate solar cells on flexible glass”, IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, FL, USA, (2013).
67. R.S. Yavorskyi, Z.R. Zapukhlyak, Ya.S. Yavorskyi, L.I. Nykyruiy. Vapor Phase Condensation for Photovoltaic CdTe Films. Physics and Chemistry of Solid State V. 18, №4 (2017) P. 410-416. DOI: 10.15330/pcss.18.4.416.
68. J. C. Manifacier, J. Gasiot, and J. P. Fillard, J. Phys. E: Sci. Instrum. 9, 1002 (1976).
69. R. Swanepoel, J. Phys. E, Sci. Instrum. 16, 1214 (1983).
70. R. Swanepoel, J. Phys. E, Sci. Instrum. 17, 896 (1984)
71. F. Alvarez, N. Lalla, A. Lamagana, „Thin film CdS/CdTe solar cells prepared by electrodeposition using low cost material”, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 459-462, (1997).
72. L.A. Kosyachenko, A.I. Savchuk, E.V. Grushko, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on parameters of absorber layer and barrier structure, Thin Solid Films 517 (2009) 2386.
73. H.A. Mohamed, Influence of the optical and recombination losses on the efficiency of CdS/CdTe solar cell at ultrathin absorber layer, Can. J. Phys. 92 (2014) 1350.
74. L.A. Kosyachenko, E.V. Grushko, V.V. Motushchuk, Recombination losses in thin-film CdS/CdTe photovoltaic devices, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 90 (2006) 2201.
75. V.V. Brus, On quantum efficiency of nonideal solar cells, Sol. Energy 86 (2012) 786.
76. H.A. Mohamed, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on optical and recombination losses, J. Appl. Phys. 113 (2013) 093105.

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

27. G.Wisz, I.Virt, P.Sagan, P.Potera, R.Yavorskyi. Structural, optical and electrical properties of Zinc Oxide layers produced by pulsed laser deposition method // Nanoscale Research Letters. – 2017. - 12: 253. DOI:10.1186/s11671-017-2033-9
78. Punitha K. et al 2014.
79. Yavorskyi, R., Nykyruy, L., Wisz, G. et al. Appl Nanosci (2018). <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0872-z>.
80. Moshfegh A et al 2005; Punitha K et al 2014.
81. Swanepoel R 1983; Shaaban E 2012.
82. Swanepoel R: Determination of the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon. J. Phys. E 1983, 16: 1214–1224. 10.1088/0022-3735/16/12/023.
83. R. E. Treharne, A. Seymour-Pierce, K. Durose, K. Hutchings, S. Roncallo, D. Lane, Optical design and fabrication of fully sputtered CdTe/CdS solar cells, J. Phys: Conf. Ser. 286, 012038, (2011).
84. Lisco, F., Kaminski, P. M., Abbas, A., Bowers, J. W., Claudio, G., Losurdo, M., & Walls, J. M. (2015). High rate deposition of thin film cadmium sulphide by pulsed direct current magnetron sputtering. Thin Solid Films, 574, 43-51.

ДОДАТОК А

Характеристики і фізичні властивості поліетилентерефталату та поліаміда 6

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця А1. Фізичні властивості поліетилентерефталату

Властивість	Одиниця вимірювання	Значення
щільність	кг/м ³	1360 - 1400
Руйнівна напруга при: розтягуванні	МПа	
вигині		50 - 70
стисканні		80 - 120
Модуль пружності	ГПа	2,5 - 3.0
Відносне подовження при розриві	%	2 - 4
Ударна в'язкість	кДж/м ²	30
Твердість по Брінеллю	МПа	100 - 120
Водопоглинання за 24 години	%	0,3
Температура плавлення	°С	255 - 265
Температура розм'якшення	°С	245 - 248
Температура склування	°С	70 - 80
Морозостійкість	°С	-50
Теплостійкість по Мартенсу	°С	135 - 145
Діелектрична проникність при 10 ⁶ Гц		3.1
Тангенс кута діелектричних втрат при 10 ⁶ Гц		(2-8)·10 ⁻³
Електрична міцність	МВ/м	140 - 180

Таблиця А2. Властивості поліетилентерефталату

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

Газопроникність	Світлопроникність	Хімічна стійкість при 20 ⁰ С		
		до кислот	до лугів	до органічних розчинників
Висока	Прозорий	Гарна (до розбавлених кислот)	Гарна	Відмінна

Таблиця А3. Фізико-механічні та діелектричні властивості поліаміду 6 210/310

Властивість	Одиниця вимірювання	Значення
Щільність	г / см ³	1,13 - 1,14
Температура плавлення	° С	не нижче 215
Відносне подовження при розриві	%	не менше 70 - 110
Ударна в'язкість на зразках з надрізом	кДж / м ²	не менше 5,0
Межа текучості при розтягуванні	МПа	не менше 65
Твердість	МПа	не менше 100
Температура розм'якшення при напрузі вигину 1,85 МПа	° С	не менше 45
Модуль пружності при згині	ГПа	1,9 - 2,0
Руйнівна напруга при згині	МПа	60 - 70

Руйнівна напруга при розтягуванні	МПа	не менше 50
Водопоглинання	%	
за 1 годину кип'ятіння		3,5
максимальне		10 - 11
Коефіцієнт теплопровідності при 20-150 ° С	Вт / м · К	0,28
Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення * 10 ⁻⁵ , 1 / К в інтервалі температур		
від -70 до +20 ° С		1 - 8
від 20 до 160 ° С		8 - 10
Вигинаюча напруга при величині прогину рівної 1,5 товщини зразка	МПа	25 - 30
Напруга при відносній деформації стиснення 25%	Мпа	90 - 100
Коефіцієнт тертя по сталі		0,15 - 0,25
Знос по сітці	мм ³ / (м · см ²)	1,5 - 2,0
Теплостійкість за Віка, при навантаженні 9,8 Н	° С	205 - 215
Міцність при розриві	МПа	56 - 65

Міцність при 10^6 циклів (При 50 Гц)	МПа	15 - 25
Динамічний модуль Юнга	МПа 10^2	22
Питомий поверхневий електричний опір	Ом	10^{14}
Питомий об'ємний електричний опір	Ом · см	$(1-3) \cdot 10^{15}$
Електрична міцність	кВ / мм	21 - 23
Тангенс кута діелектричних втрат при частоті 10^6 Гц		0,025 - 0,03
Діелектрична проникність при частоті 10^6 Гц		3,0 - 3,6
Температура морозостійкості	° С	-45 - -40
Робочі температури	° С	80 - 100
Дугостійкість при 10 мА	° С	8 - 12
Кисневий індекс	%	24 - 25
Усадка ливарна	%	1,5 - 2,5
Довготривала міцність при розтягуванні протягом 100 ч	МПа	35 - 40

Таблиця А4. Властивості поліаміда 6 210/310 (ОСТ 6-06-С9-93)

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

Властивість	Одиниця вимірювання	Значення
Зовнішній вигляд		Гранули від білого до світло-жовтого кольору або пофарбовані
Кількість сторонніх і окислених частинок, на 100 г продукту	шт	не більше 18
Розмір гранул (довжина)	мм	1,5 - 4,0
Температура плавлення, не менше	° C	215
Масова частка води	%	не більше 0,2
Відносна в'язкість		2,6 - 3,2
Масова частка речовин, що екстрагуються, не більше	%	1,5
Масова частка непрорублених гранул до 20 мм, не більше	%	0,5

ДОДАТОК Б

Різновиди марок поліаміда 6

Таблиця Б1. Марки поліаміда 6

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Марка	Опис	Нормативний документ
ПА 6-210 / 310	Поліамід ПА 6	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-210 / 311	Поліамід ПА 6 наявність добавки	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-130	низковязкий поліамід ПА 6 з часткою екстрагованих речовин не більше 13%	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-211-ДС (Перший і вищий сорт)	Склонаповнений (довге скло) середня в'язкість	ГОСТ 17648-83
ПА 6-211-04	ПА 6 з двоокисом титану середня в'язкість	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-211-12	термостабілізованого ПА 6 середня в'язкість	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-211-15	Світло-термостабілізовані середня в'язкість	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-211-17	Стабілізований мідним комплексом середня в'язкість	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-211-21	З додаванням сажі середня в'язкість	ОСТ 6-06-С9-93
ПА 6-211-22	Пофарбований	ОСТ 6-06-С9-93

	середня в'язкість	
ПА 6-210-КС	Склонаповнений короткий скло) середня в'язкість	ОСТ 6-11-498-79
ПА 6-211-КС	Склонаповнений (короткий скло) середня в'язкість	ОСТ 6-11-498-79
ПА 6-210-ДС	Склонаповнений (довге скло) середня в'язкість	ГОСТ 17648-83
ПА 6 ЛСВ30	Склонаповнений (30% скловолокна) середня в'язкість	ТУ 6-06-204-91
Поліамід УПА 6-5	Вугленаповнений (5% вуглеволокна)	ТУ 6-12-31-654-89
Поліамід УПА 6-10	Вугленаповнений (10% вуглеволокна)	ТУ 6-12-31-654-89
Поліамід УПА 6-15	Вугленаповнений (15% вуглеволокна)	ТУ 6-12-31-654-89
Поліамід УПА 6-20	Вугленаповнений (20% вуглеволокна)	ТУ 6-12-31-654-89
Поліамід УПА 6-30	Вугленаповнений (30% вуглеволокна)	ТУ 6-12-31-654-89
Поліамід	Вугленаповнений	ТУ 6-12-31-654-89

УПА 6-40	(40% вуглеволокна)	
----------	--------------------	--

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

ДОДАТОК В

Фізичні та теплові властивості, термічний коефіцієнт розширення плівки
Kapton

					БР.171.051.010 ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця В1. Фізичні властивості Kapton® типу 100 HN плівки, 25 мкм (1 міл)

Фізична власність	Типове значення в		Метод випробування
	23°C (73°F)	200°C (392°F)	
Максимальна міцність при розтягуванні, МПа (psi)	231 (33,500)	139 (20,000)	ASTM D-882-91, Метод А*
Точка виходу на рівні 3%, МПа (psi)	69 (10,000)	41 (6000)	ASTM D-882
Напруга для отримання 5% подовження, МПа (фунт / кв.дюйм)	90 (13,000)	61 (9000)	ASTM D-882
Остаточне подовження, %	72	83	ASTM D-882
Модуль розтягування, GPa (psi)	2.5 (370,000)	2.0 (290,000)	ASTM D-882
Міцність удару, N • см (фут • фунт)	78		(0.58) Пневматичний ударний тест DuPont
Folding Endurance (MIT), цикли	285,000		ASTM D-2176

Міцність розриву - розмноження (Elmendorf), N (фунт)	0.07 (0.02)		ASTM D-1922
Сила розриву — Початкова (Могили), N (фунт)	7.2 (1.6)		ASTM D-1004
Щільність, г / см або г / мл	1.42		ASTM D-1505
Коефіцієнт тертя — кінетичний (фільм до плівки)	0.48		ASTM D-1894
Коефіцієнт тертя — статичний (фільм до плівки)	0.63		ASTM D-1894
Індекс заломлення (натрієва лінія D)	1.70		ASTM D-542
Коефіцієнт Пуассона	0.34		Avg. Three Samples Elongated at 5%, 7%, 10%
Гнучкість при низьких температурах	Задовільно		IPC TM 650, Method 2.6.18

* розмір зразка: 225 x 150 мм (1 x 6 дюймів); поділ щелепи: 100 мм (4 дюйми); швидкість щелепи: 50 мм / хв (2 в / хв); Остаточна відноситься до міцності на розрив і подовження, виміряного при розриві.

Таблиця В2. Теплові властивості плівки Kapton® типу 100 HN, 25 мкм (1 міл)

Теплові властивості	Типове значення	Умови випробування	Метод випробування
Точка плавлення	Немає	Немає	ASTM E-794 (1989)
Тепловий коефіцієнт лінійного розширення	20 ppm / ° C (11 ppm / ° F)	-14 до 38 ° C (Від 7 до 100 ° F)	ASTM D-696
Коефіцієнт теплопровідності, Вт / м · К Cal/см · сек · ° C	0.12 $2,87 \times 10^{-4}$	296 K 23 ° C	ASTM F-433 (1987)
Питома теплота, Дж / г · К (кал / г · ° C)	1,09 (0,261)		Диференціальна калориметрія
Горючість	94V-0		UL-94 (2-8-85)
Усадка, %	0,17 1.25	30 хв при 150 ° C 120 хв при 400 ° C	IPC TM 650, метод 2.2.4A ASTM D-5214
Термозварювальність	Не тепложварювальна		

Обмеження індексу кисню, %	37		ASTM D- 2863
Поплавок	Задовільно		IPC TM 650, метод 2.4.13A
Генерація диму	DM = <1	Димова камера НБС	NFPA-258
Температура склування (Tg)	Перехід другого порядку відбувається в Kapton® між 360 ° C (680 ° F) і 410 ° C (770 ° F) і вважається температурою склування. Різні методи вимірювання дають різні результати в межах вищевказаного діапазону температур.		

Таблиця В3. Термічний коефіцієнт розширення, тип плівки HN, 25 мкм (1 міл), термічно експонований

Діапазон температур, ° C (° F)	ppm / ° C
30–100 (86–212)	17
100–200 (212–392)	32
200–300 (392–572)	40
300–400 (572–752)	44
30–400 (86–752)	34